

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUAN FELIPE GOMES SILVA DE LIMA

ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS COM DISPOSITIVOS TCSC VIA  
MÉTODO DESACOPLADO-RÁPIDO MODIFICADO

CURITIBA

2020

LUAN FELIPE GOMES SILVA DE LIMA

ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS COM DISPOSITIVOS TCSC VIA  
MÉTODO DESACOPLADO-RÁPIDO MODIFICADO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração Sistemas de Energia, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Elizete Maria Lourenço  
Coorientador: Prof. Dr. Odilon Luis Tortelli

CURITIBA

2020

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

L732e      Lima, Luan Felipe Gomes Silva de  
              Estimação de estados em sistemas com dispositivos TCSC via método desacoplado  
              rápido modificado [recurso eletrônico] Luan Felipe Gomes Silva de Lima. – Curitiba, 2020.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Elétrica, 2020.

Orientadora: Elizete Maria Lourenço.  
Coorientador: Odilon Luis Tortelli.

1. Sistemas de transmissão de dados. 2. Controladores elétricos. 3. Redes elétricas. I.  
Universidade Federal do Paraná. II. Lourenço, Elizete Maria. III. Tortelli, Odilon Luis.  
IV. Título.

CDD: 621.317

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928





MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA  
ELÉTRICA - 40001016043P4

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **LUAN FELIPE GOMES SILVA DE LIMA** intitulada: **ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS COM DISPOSITIVOS TCSC VIA MÉTODO DESACOPLADO RÁPIDO MODIFICADO**, sob orientação da Profa. Dra. ELIZETE MARIA LOURENÇO, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 28 de Julho de 2020.

Aguardando Assinatura Eletrônica

ELIZETE MARIA LOURENÇO  
Presidente da Banca Examinadora

Aguardando Assinatura Eletrônica

GIDEON VILLAR LEANDRO  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Aguardando Assinatura Eletrônica

MADSON CORTES DE ALMEIDA  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS)

Aguardando Assinatura Eletrônica

ROMAN KUIAVA  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha mãe Meri, pelo amor, apoio e incentivo incondicionais em todos os momentos da minha vida. Obrigado por ter me ensinado a perseguir meus objetivos de cabeça erguida. És meu porto seguro e em quem me espelho na tentativa de me tornar um ser humano melhor a cada dia.

Agradeço à minha tia Maria Helena, à minha avó Clair e à toda a minha família pela compreensão, pois mesmo no período em que estive distante, mantiveram um profundo apoio às minhas atividades acadêmicas. Obrigado pelos pensamentos positivos, orações e palavras de incentivo que, sem dúvidas, me auxiliaram a enfrentar e superar as dificuldades encontradas no caminho.

Agradeço à minha orientadora, Professora Elizete, e ao meu coorientador, Professor Odilon, pela atenção, dedicação, paciência e disponibilidade nos momentos que compartilhamos nos últimos dois anos. Obrigado também pela confiança em mim depositada ao longo do desenvolvimento do trabalho, pois, sem suas orientações e apoio, nada disso seria possível.

Agradeço ainda aos Professores Roman Kuiava, Gideon Villar e Madson Cortes, pelas importantes contribuições para o desfecho do trabalho. Agradeço pela leitura cuidadosa, observações e sugestões que, com toda a certeza, contribuíram enormemente com a qualidade final da dissertação.

Agradeço também à CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal e Nível Superior – pelo auxílio financeiro fornecido para o desenvolvimento do trabalho.

## RESUMO

A recente popularização e crescente inserção de controladores *FACTS* nos sistemas de potência ao redor do mundo ensejou a necessidade de modelar e inserir tais dispositivos nas metodologias tradicionalmente empregadas na operação e análise de sistemas de energia. O conceito de *FACTS* está diretamente relacionado ao aprimoramento dos sistemas existentes, tornando-os eletronicamente controláveis. São dispositivos que atuam ativamente no controle das principais grandezas do sistema de forma a flexibilizar sua operação, uma oportunidade especialmente relevante em um contexto de *Smart Grid*. O presente trabalho de pesquisa se concentra na estimação de estados de sistemas de potência que contém dispositivos *FACTS*, especificamente o controlador *TCSC*, propondo duas abordagens distintas para tratar o problema de estimação de estados em sistemas em que o referido controlador é inserido. A primeira abordagem proposta se refere à adaptação da formulação de mínimos quadrados ponderados linearizada do problema de estimação de estados, com intuito de inserir o parâmetro de controle do *TCSC* como uma nova variável de estado para o problema, a ser estimada em conjunto com as variáveis de estado tradicionais do modelo linearizado da rede. A segunda abordagem proposta diz respeito a um estimador de estado baseado na formulação desacoplado-rápido do método de mínimos quadrados ponderados, capaz de processar conjuntos de medidas obtidos de sistemas de transmissão que contém o controlador *FACTS TCSC*. As reatâncias equivalentes dos controladores são inseridas como novas variáveis de estado no subproblema ativo da formulação desacoplado-rápido, sendo estimadas em conjunto com as variáveis de estado tradicionais do sistema. Além fornecer uma estimativa dos parâmetros de controle dos *TCSCs* e variáveis de estado tradicionais a partir de um conjunto de medidas obtidas pelo sistema *SCADA*, as abordagens propostas possuem aplicações na determinação das reatâncias equivalentes dos controladores necessárias para que sejam mantidos os fluxos de potência ativa especificados para os ramos controlados, considerando os modelos linear e não linear da rede. Os resultados apontam para uma boa aplicabilidade dos métodos propostos, capazes de estimar com precisão e eficiência os parâmetros de controle dos *TCSCs* sob diferentes condições operativas para diferentes sistemas-teste de transmissão.

Palavras-chave: Estimação de Estados. *FACTS*. Thyristor Controlled Series Capacitor. Método Desacoplado-Rápido. Sistemas de Transmissão.

## **ABSTRACT**

The recent popularization and increasing insertion of FACTS controllers in power systems gave rise to the need for modeling and inserting such devices in the traditional power system analysis and operation applications. The concept of FACTS is directly related to the improvement of existing installations, making them electronically controllable. FACTS controllers provide active control of many of the power system magnitudes, which flexibilities the system operation with especially relevant opportunities in the Smart Grid context. The present research work focuses on the state estimation of power systems with FACTS, specifically the TCSC controller, proposing two different approaches to address the state estimation problem for power systems with TCSC. The first proposed approach refers to an adaptation of the linearized weighted least squares formulation of the state estimation problem, in which the TCSC's control parameter is inserted as a new state variable for the linearized state estimation problem, being estimated together with the traditional state variables of the linearized power system model. The second proposed approach concerns to an adaptation of the weighted least squares fast-decoupled state estimator, capable of processing measurements obtained from transmission systems with TCSC. The controllers' equivalent reactances are inserted as new state variables in the active subproblem of the fast-decoupled formulation, being estimated together with the traditional state variables of the system. Besides providing an estimate of the control parameters of the TCSCs and traditional state variables from a set of measurements obtained by the SCADA system, the proposed approaches have applications in determining the necessary controllers' equivalent reactances to maintain the desired active power flows through controlled branches, considering the linear and non-linear models of the network. The results point to good applicability of the proposed methods, which are capable of estimating the control parameters of the TCSCs with accuracy and efficiency, under different operating conditions for different transmission systems.

**Keywords:** State Estimation. FACTS. Thyristor Controlled Series Capacitor. Fast-Decoupled Method. Transmission Systems.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 3.1 - FLUXOGRAMA DO GERADOR DE GRANDEZAS MEDIDAS PERFEITAS .....	43
FIGURA 3.2 - FLUXOGRAMA DO GERADOR DE ERROS ALEATÓRIOS.....	45
FIGURA 3.3 - SÍMBOLO GERAL PARA CONTROLADORES FACTS .....	54
FIGURA 3.4 – MÓDULO BÁSICO DO TCSC.....	55
FIGURA 3.5 - ESTRUTURA MONOFÁSICA DE UM TCSC REAL .....	56
FIGURA 3.6 - IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE DO TCSC VERSUS ÂNGULO DE DISPARO .....	58
FIGURA 4.1 - MODELO MONOFÁSICO SIMPLIFICADO DO TCSC .....	61
FIGURA 4.2 - REATÂNCIA EQUIVALENTE VARIÁVEL DO TCSC EM DIFERENTES CONDIÇÕES OPERATIVAS.....	62
FIGURA 4.3 - FLUXOGRAMA DO MÉTODO TCSC-LSE .....	69
FIGURA 4.4 – RAMO GENÉRICO QUE CONECTA AS BARRAS $k$ E $m$ .....	70
FIGURA 4.5 - TCSC RESPONSÁVEL PELO CONTROLE DO FLUXO DE POTÊNCIA ATIVA NO RAMO $k-m$ .....	71
FIGURA 4.6 - FLUXOGRAMA DO FCDR PARA SISTEMAS COM TCSC.....	80
FIGURA 4.7 - MEDIDAS EM UM RAMO CUJO FLUXO DE POTÊNCIA ATIVA É CONTROLADO POR TCSC.....	81
FIGURA 4.8 - FLUXOGRAMA DO MÉTODO TCSC-SE.....	97
FIGURA 5.1 - SISTEMA 14 BARRAS IEEE MODIFICADO COM TCSCS.....	99
FIGURA 5.2 - SISTEMA-TESTE IEEE 30 BARRAS .....	105
FIGURA 5.3 - SISTEMA-TESTE IEEE 118 BARRAS .....	105
FIGURA AP.0.1 - FLUXOGRAMA DO ESTIMADOR DE ESTADO MQP .....	154
FIGURA A.0.1 - FLUXOGRAMA DO ESTIMADOR DE ESTADO DESACOPLADO-RÁPIDO.....	167



## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - DADOS DE MEDIÇÃO PARA O SISTEMA IEEE 14 BARRAS: CASO BASE.....	100
TABELA 2 - VALORES CALCULADOS E ESTIMADOS PARA O SISTEMA IEEE 14 BARRAS: CASO BASE.....	100
TABELA 3 - DADOS DE MEDIÇÃO PARA O SISTEMA IEEE 14 BARRAS: CASO 1 .....	101
TABELA 4 - VALORES CALCULADOS E ESTIMADOS PARA O SISTEMA IEEE 14 BARRAS: CASO 1 .....	102
TABELA 5 - DADOS DE MEDIÇÃO PARA O SISTEMA IEEE 14 BARRAS: CASO 2 .....	102
TABELA 6 - VALORES CALCULADOS E ESTIMADOS PARA O SISTEMA IEEE 14 BARRAS: CASO 2 .....	102
TABELA 7 - VALORES CALCULADOS E ESTIMADOS PARA O SISTEMA IEEE 14 BARRAS: CASO 3 .....	103
TABELA 8 - VALORES CALCULADOS E ESTIMADOS PARA O SISTEMA IEEE 14 BARRAS: CASO 4 .....	103
TABELA 9 - RESULTADOS DO FLUXO DE CARGA DO CASO BASE SISTEMA IEEE 14 BARRAS.....	109
TABELA 10 - DEFINIÇÃO DOS RAMOS CRÍTICOS DO SISTEMA <i>IEEE</i> 14 BARRAS .....	109
TABELA 11 - PLANO DE MEDIÇÃO DEFINIDO PARA O SISTEMA <i>IEEE</i> 14 BARRAS .....	110
TABELA 12 - CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO DEFINIDOS PARA O SISTEMA <i>IEEE</i> 14 BARRAS.....	111
TABELA 13 - VETORES DE MEDIDAS PERFEITAS DO CASO BASE SISTEMA <i>IEEE</i> 14 BARRAS.....	111
TABELA 14 - VETORES DE MEDIDAS DO CASO BASE SISTEMA <i>IEEE</i> 14 BARRAS .....	112
TABELA 15 – VARIÁVEIS DE ESTADO CALCULADAS E ESTIMADAS NO CASO BASE DO SISTEMA <i>IEEE</i> 14 BARRAS.....	113
TABELA 16 - VARIÁVEIS DE ESTADO CALCULADAS PARA O SISTEMA <i>IEEE</i> 14 BARRAS NO CASO INDUTIVO 1 .....	114

TABELA 17 - VETORES DE MEDIDAS DO CASO INDUTIVO 1 DO SISTEMA <i>IEEE</i> 14 BARRAS.....	115
TABELA 18 - VARIÁVEIS DE RESTADO CALCULADAS E ESTIMADAS NO CASO INDUTIVO 1 DO SISTEMA <i>IEEE</i> 14 BARRAS .....	116
TABELA 19 - FLUXOS DE POTÊNCIA ATIVA ESTIMADOS E CALCULADOS NOS RAMOS CONTROLADOS PARA O CASO INDUTIVO 1 DO SISTEMA <i>IEEE</i> 14 BARRAS.....	117
TABELA 20 - VARIÁVEIS DE RESTADO CALCULADAS E ESTIMADAS NO CASO INDUTIVO 2 DO SISTEMA <i>IEEE</i> 14 BARRAS .....	117
TABELA 21 – VARIÁVEIS DE RESTADO CALCULADAS E ESTIMADAS NO CASO CAPACITIVO 1 DO SISTEMA <i>IEEE</i> 14 BARRAS.....	118
TABELA 22 - FLUXOS DE POTÊNCIA ATIVA ESTIMADOS E CALCULADOS NOS RAMOS CONTROLADOS PARA O CASO CAPACITIVO 1 DO SISTEMA <i>IEEE</i> 14 BARRAS.....	119
TABELA 23 - VARIÁVEIS DE RESTADO CALCULADAS E ESTIMADAS NO CASO CAPACITIVO 2 DO SISTEMA <i>IEEE</i> 14 BARRAS .....	120
TABELA 24 - DEFINIÇÃO DOS RAMOS CRÍTICOS DO SISTEMA <i>IEEE</i> 30 BARRAS .....	122
TABELA 25 - PLANO DE MEDIÇÃO DEFINIDO PARA O SISTEMA <i>IEEE</i> 30 BARRAS .....	122
TABELA 26 - CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO DEFINIDOS PARA O SISTEMA <i>IEEE</i> 30 BARRAS.....	123
TABELA 27 - VARIÁVEIS DE RESTADO CALCULADAS E ESTIMADAS NO CASO BASE DO SISTEMA <i>IEEE</i> 30 BARRAS.....	124
TABELA 28 - VARIÁVEIS DE RESTADO CALCULADAS E ESTIMADAS NO CASO INDUTIVO 1 DO SISTEMA <i>IEEE</i> 30 BARRAS .....	125
TABELA 29 - VARIÁVEIS DE RESTADO CALCULADAS E ESTIMADAS NO CASO INDUTIVO 2 DO SISTEMA <i>IEEE</i> 30 BARRAS .....	125
TABELA 30 - FLUXOS DE POTÊNCIA ATIVA ESTIMADOS E CALCULADOS NOS RAMOS CONTROLADOS PARA OS CASOS INDUTIVO 1 E INDUTIVO 2 DO SISTEMA <i>IEEE</i> 30 BARRAS.....	127
TABELA 31 - VARIÁVEIS DE RESTADO CALCULADAS E ESTIMADAS NO CASO CAPACITIVO 1 DO SISTEMA <i>IEEE</i> 30 BARRAS.....	128

TABELA 32 - VARIÁVEIS DE RESTADO CALCULADAS E ESTIMADAS NO CASO CAPACITIVO 2 DO SISTEMA <i>IEEE</i> 30 BARRAS.....	129
TABELA 33 - FLUXOS DE POTÊNCIA ATIVA ESTIMADOS E CALCULADOS NOS RAMOS CONTROLADOS PARA OS CASOS CAPACITIVO 1 E CAPACITIVO 2 DO SISTEMA <i>IEEE</i> 30 BARRAS.....	130
TABELA 34 - DEFINIÇÃO DOS RAMOS CRÍTICOS DO SISTEMA <i>IEEE</i> 118 BARRAS .....	131
TABELA 35 - CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO DEFINIDOS PARA O SISTEMA <i>IEEE</i> 118 BARRAS.....	132
TABELA 36 - VARIÁVEIS DE RESTADO CALCULADAS E ESTIMADAS PARA AS BARRAS TERMINAIS DOS RAMOS CRÍTICOS NO CASO BASE DO SISTEMA <i>IEEE</i> 118 BARRAS.....	132
TABELA 37 – NÚMERO DE ITERAÇÕES E TEMPO NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DA SOLUÇÃO CONVERGIDA NO CASO BASE DO SISTEMA <i>IEEE</i> 118 BARRAS.....	133
TABELA 38 – RESULTADOS PARA AS REATÂNCIAS EQUIVALENTES DOS TCSCS, BARRAS TERMINAIS E BARRAS ADICIONAIS ASSOCIADAS AOS CONTROLADORES NO CASO INDUTIVO 1 DO SISTEMA <i>IEEE</i> 118 BARRAS ..	134
TABELA 39 - NÚMERO DE ITERAÇÕES E TEMPO NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DA SOLUÇÃO CONVERGIDA NO CASO INDUTIVO 1 DO SISTEMA <i>IEEE</i> 118 BARRAS .....	135
TABELA 40 - FLUXOS DE POTÊNCIA ATIVA ESTIMADOS E CALCULADOS NOS RAMOS CONTROLADOS DO CASO INDUTIVO 1 DO SISTEMA <i>IEEE</i> 118 BARRAS .....	135
TABELA 41 - RESULTADOS PARA AS REATÂNCIAS EQUIVALENTES DOS TCSCS, BARRAS TERMINAIS E BARRAS ADICIONAIS ASSOCIADAS AOS CONTROLADORES NO CASO INDUTIVO 2 DO SISTEMA <i>IEEE</i> 118 BARRAS ..	136
TABELA 42 - NÚMERO DE ITERAÇÕES E TEMPO NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DA SOLUÇÃO CONVERGIDA NO CASO INDUTIVO 2 DO SISTEMA <i>IEEE</i> 118 BARRAS .....	137
TABELA 43 - FLUXOS DE POTÊNCIA ATIVA ESTIMADOS E CALCULADOS NOS RAMOS CONTROLADOS DO CASO INDUTIVO 2 DO SISTEMA <i>IEEE</i> 118 BARRAS .....	138

TABELA 44 - RESULTADOS PARA AS REATÂNCIAS EQUIVALENTES DOS TCSCS, BARRAS TERMINAIS E BARRAS ADICIONAIS ASSOCIADAS AOS CONTROLADORES NO CASO CAPACITIVO 1 DO SISTEMA <i>IEEE</i> 118 BARRAS .....	139
TABELA 45 - NÚMERO DE ITERAÇÕES E TEMPO NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DA SOLUÇÃO CONVERGIDA NO CASO CAPACITIVO 1 DO SISTEMA <i>IEEE</i> 118 BARRAS .....	139
TABELA 46 - FLUXOS DE POTÊNCIA ATIVA ESTIMADOS E CALCULADOS NOS RAMOS CONTROLADOS DO CASO CAPACITIVO 1 DO SISTEMA <i>IEEE</i> 118 BARRAS.....	140
TABELA 47 - RESULTADOS PARA AS REATÂNCIAS EQUIVALENTES DOS TCSCS, BARRAS TERMINAIS E BARRAS ADICIONAIS ASSOCIADAS AOS CONTROLADORES NO CASO CAPACITIVO 2 DO SISTEMA <i>IEEE</i> 118 BARRAS .....	141
TABELA 48 - NÚMERO DE ITERAÇÕES E TEMPO NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DA SOLUÇÃO CONVERGIDA NO CASO CAPACITIVO 2 DO SISTEMA <i>IEEE</i> 118 BARRAS .....	141
TABELA 49 - FLUXOS DE POTÊNCIA ATIVA ESTIMADOS E CALCULADOS NOS RAMOS CONTROLADOS DO CASO CAPACITIVO 2 DO SISTEMA <i>IEEE</i> 118 BARRAS.....	142
TABELA 50 - PLANO DE MEDIÇÃO ADOTADO PARA O SISTEMA <i>IEEE</i> 118 BARRAS - MEDIDAS DE FLUXOS DE POTÊNCIA ATIVA E REATIVA.....	155
TABELA 51 - PLANO DE MEDIÇÃO ADOTADO PARA O SISTEMA <i>IEEE</i> 118 BARRAS - MEDIDAS DE INJEÇÕES DE POTÊNCIAS E MAGNITUDES DE TENSÃO .....	157
TABELA 52 - VARIÁVEIS DE RESTADO CALCULADAS E ESTIMADAS NO CASO BASE DO SISTEMA <i>IEEE</i> 118 BARRAS .....	158
TABELA 53 – MÓDULOS E ÂNGULOS DE TENSÃO CALCULADOS E ESTIMADOS NO CASO INDUTIVO 1 DO SISTEMA <i>IEEE</i> 118 BARRAS .....	159
TABELA 54 – REATÂNCIAS EQUIVALENTES DOS TCSCS CALCULADAS E ESTIMADAS NO CASO INDUTIVO 1 DO SISTEMA <i>IEEE</i> 118 BARRAS .....	161
TABELA 55 - MÓDULOS E ÂNGULOS DE TENSÃO CALCULADOS E ESTIMADOS NO CASO INDUTIVO 2 DO SISTEMA <i>IEEE</i> 118 BARRAS .....	161

TABELA 56 - REATÂNCIAS EQUIVALENTES DOS TCSCS CALCULADAS E ESTIMADAS NO CASO INDUTIVO 2 DO SISTEMA IEEE 118 BARRAS .....	162
TABELA 57 - MÓDULOS E ÂNGULOS DE TENSÃO CALCULADOS E ESTIMADOS NO CASO CAPACITIVO 1 DO SISTEMA <i>IEEE</i> 118 BARRAS .....	163
TABELA 58 - REATÂNCIAS EQUIVALENTES DOS TCSCS CALCULADAS E ESTIMADAS NO CASO CAPACITIVO 1 DO SISTEMA <i>IEEE</i> 118 BARRAS.....	164
TABELA 59 - MÓDULOS E ÂNGULOS DE TENSÃO CALCULADOS E ESTIMADOS NO CASO CAPACITIVO 2 DO SISTEMA <i>IEEE</i> 118 BARRAS .....	164
TABELA 60 - REATÂNCIAS EQUIVALENTES DOS TCSCS CALCULADAS E ESTIMADAS NO CASO CAPACITIVO 2 DO SISTEMA <i>IEEE</i> 118 BARRAS.....	166



## LISTA DE SIGLAS

*AMI – Advanced Metering Infrastructure*  
*CA – Corrente Alternada*  
*CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior*  
*CC – Corrente Contínua*  
*D-FACTS – Distribution Flexible AC Transmission Systems*  
*DR – Desacoplado-rápido*  
*EE – Estimação de Estados*  
*EE-DR – Estimador de Estado Desacoplado-Rápido*  
*FACTS – Flexible AC Transmission Systems*  
*FC – Fluxo de Carga*  
*FCDR – Fluxo de Carga Desacoplado-rápido*  
*FPO – Fluxo de Potência Ótimo*  
*GPS – Global Positioning System*  
*GTO – Gate Turn-off Thyristor*  
*IEEE – Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos*  
*IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor*  
*IPC – Interphase Power Controller*  
*IPFC – Interline Power Flow Controller*  
*MCC – Maximum Correntropy Criterion*  
*MQP – Mínimos Quadrados Ponderados*  
*MQP-DR – Mínimos Quadrados Ponderados Desacoplado Rápido*  
*PMU – Phasor Measurement Unit*  
*RTU – Remote Terminal Unit*  
*SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition*  
*SCR – Silicon Controlled Rectifier*  
*SECJ – State Estimation Using Constructed Jacobian*  
*SSG – Static Synchronous Generator*  
*SSSC – Static Synchronous Series Compensator*  
*STATCOM – Static Synchronous Compensator*  
*ST-MEAV – Spanning Tree Maximum Exponential Absolute Value*  
*SVC – Static Var Compensator*  
*SVC-T – Static VAR Compensator with a Transformer*

*T&D – Transmissão e Distribuição*

*TC – Transformador de Corrente*

*TCR – Thyristor Controlled Reactor*

*TCSC – Thyristor Controlled Series Capacitor*

*TCSC-LSE – Thyristor Controlled Series Capacitor Linearized State Estimator*

*TCSC-SE – Thyristor Controlled Series Capacitor State Estimator*

*TCSR – Thyristor Controlled Series Reactor*

*TP – Transformador de Potencial*

*TSC – Thyristor-Switched Capacitor*

*TSR – Thyristor-Switched Reactor*

*TSSC – Thyristor-Switched Series Capacitor*

*UIPC – Unified Interphase Power Controller*

*UPFC – Unified Power Flow Controller*

*VSC – Voltage Sourced Converter*

*VSC-MTDC – Multi-Terminal High Voltage Direct Current Transmission Based on VSC*

*WLAV – Weighted Least Absolute Value*

*WLS – Weighted Least Squares*

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	17
1.1	CONTEXTO	17
1.2	OBJETIVOS	20
1.2.1	Objetivo Geral	20
1.2.2	Objetivos Específicos	21
1.3	JUSTIFICATIVA	21
1.4	CONTRIBUIÇÕES	21
1.5	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	22
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	24
2.1	ESTIMAÇÃO DE ESTADOS COM <i>FACTS</i>	24
2.2	ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SISTEMAS COM <i>FACTS</i>	30
2.3	FORMULAÇÕES ALTERNATIVAS PARA O PROBLEMA DE ESTIMAÇÃO DE ESTADOS	31
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	34
3.1	ESTIMAÇÃO DE ESTADOS	35
3.1.1	Premissas e modelo de medição	36
3.1.2	Gerador de Grandezas Medidas	39
3.1.3	Formulação <i>MQP</i> do problema de <i>EE</i>	45
3.1.4	Formulação <i>EE-DR</i>	47
3.1.5	Método <i>MQP</i> Linearizado	50
3.2	CONTROLADORES <i>FACTS</i>	51
3.2.1	<i>Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)</i>	55
<b>4</b>	<b>ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO COM CONTROLADORES <i>FACTS</i></b>	60
4.1	ESTIMADOR DE ESTADO <i>MQP</i> LINEARIZADO COM <i>FACTS</i>	60
4.1.1	Modelagem linearizada do fluxo de potência através do <i>TCSC</i>	61

4.1.2	Gerador de grandezas medidas linearizado para sistemas de transmissão com <i>TCSCs</i> .....	63
4.1.3	Estimador de Estado <i>MQP</i> linearizado para sistemas com <i>TCSCs</i> .....	66
4.2	ESTIMADOR DE ESTADO DESACOPLADO-RÁPIDO COM FACTS .....	70
4.2.1	Modelagem não linear do <i>TCSC</i> .....	70
4.2.2	Gerador de grandezas medidas não linear para sistemas com <i>TCSCs</i> .....	73
4.2.3	Estimador de estado desacoplado-rápido para sistemas com <i>TCSC</i> .....	80
<b>5</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>98</b>
5.1	<i>TCSC-LSE</i> .....	98
5.2	<i>TCSC-SE</i> .....	104
5.2.1	Sistemas-teste .....	104
5.2.2	Planos de medição e cenários de simulação .....	106
5.2.3	Sistema <i>IEEE</i> 14 Barras.....	108
5.2.4	Sistema <i>IEEE</i> 30 Barras.....	121
5.2.5	Sistema <i>IEEE</i> 118 Barras.....	131
5.3	DISCUSSÃO ACERCA DOS RESULTADOS .....	143
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>145</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>148</b>
	<b>APÊNDICE – A .....</b>	<b>154</b>
	<b>APÊNDICE – B .....</b>	<b>155</b>
	<b>APÊNDICE – C .....</b>	<b>158</b>
	<b>ANEXO – A.....</b>	<b>167</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Nesse capítulo é apresentada a contextualização do problema abordado pelo presente trabalho de pesquisa. Além disso, são apresentados também os objetivos (geral e específicos), a justificativa que norteia o desenvolvimento do trabalho e suas contribuições para a comunidade científica. Por fim, a estrutura adotada na elaboração da dissertação é apresentada.

## 1.1 CONTEXTO

Desde que se fez presente na vida cotidiana das pessoas comuns, a energia elétrica passou a ter relevância cada vez maior para o desenvolvimento e conforto humanos. Inicialmente utilizada para fins científicos e como alternativa aos sistemas de iluminação à base de fluidos combustíveis, graças aos avanços científicos e tecnológicos alcançados no último século, hoje a energia elétrica se faz presente na maioria das tecnologias indispensáveis para o desenvolvimento das sociedades contemporâneas. Naturalmente os sistemas elétricos ao redor do mundo foram atualizados ao longo do tempo, crescendo em porte e incorporando novas tecnologias para atender aos crescimentos populacional e de demanda. Assim, os sistemas elétricos encontram-se em constante transformação.

Entre as principais transformações ocorridas nas últimas três décadas, destacam-se a tendência à descentralização da geração, decorrente da popularização das fontes renováveis de energia e da inserção de geração distribuída, a regulamentação do setor de comercialização de energia e a crescente pressão pelo uso consciente dos recursos naturais. Nesse panorama os sistemas de potência tornam-se cada vez mais complexos, o que constantemente impõe novos desafios para as aplicações de operação e controle.

A grande maioria dos problemas que acometem os sistemas elétricos são tradicionalmente contornados pela construção de novas centrais geradoras, subestações e linhas de transmissão: uma solução onerosa e associada a um elevado tempo de implantação. Nesse sentido, a busca por soluções que permitissem otimizar o uso das estruturas já disponíveis, mantendo ou ampliando seus níveis de segurança



e confiabilidade, apontou para os dispositivos de controle baseados em eletrônica de potência.

Nas últimas cinco décadas o desenvolvimento e aprimoramento da tecnologia de semicondutores de potência e, mais recentemente, o advento do conceito de *Smart Grid*, expandiu o leque de possibilidades para os sistemas de potência. Entre as novas possibilidades está a tecnologia dos *Flexible AC Transmission Systems*, ou apenas *FACTS*: controladores baseados em dispositivos eletrônicos de potência, capazes de flexibilizar a operação dos sistemas elétricos, oferecendo uma série de vantagens quando comparados aos dispositivos de controle tradicionais baseados em mecanismos eletromecânicos (ACHA et al., 2004). A crescente utilização dos controladores *FACTS* se justifica pela enorme gama de vantagens proporcionadas por tais dispositivos, dentre as quais se destacam melhorias na confiabilidade e estabilidade do sistema no qual estão inseridos (CHITSAZAN; FADALI; TRZYNADLOWSKI, 2017; KOLOSOK; TIKHONOV, 2017; XU; ABUR, 2004).

O controle eletrônico proporcionado pelos controladores *FACTS* permite controlar de forma rápida, contínua, precisa e eficiente diversas grandezas dos sistemas elétricos como: fluxos de corrente e potência, magnitudes e ângulos de fase de tensões, e também parâmetros físicos como impedâncias de linhas de transmissão e compensações de reativos (TORTELLI, 2010). Tais benefícios justificam a rápida popularização da tecnologia de *FACTS* nos sistemas de potência ao redor do mundo, surgindo como uma alternativa viável para solucionar problemas tradicionalmente superados pela construção de novas subestações, linhas de transmissão e centrais geradoras.

A principal função de um dos controladores *FACTS* mais populares atualmente, objeto de diversas publicações e estudos ao redor do mundo, diz respeito ao controle do fluxo de potência ativa no ramo em que é instalado. A distribuição dos fluxos de potência em um sistema elétrico é tradicionalmente regida pelos valores das impedâncias dos equipamentos e linhas de transmissão. Na ocasião de uma contingência, cabe ao operador do sistema intervir afim de minimizar riscos de acidentes e danos às instalações, o que pode requerer a redistribuição dos fluxos de potência no sistema. Nesse sentido, a possibilidade de controlar tais grandezas de forma rápida e eficaz se torna extremamente relevante e atrativa do ponto de vista operacional. O referido controlador *FACTS* é designado por *Thyristor Controlled Series Capacitor*, ou pelo acrônimo *TCSC*.

Em uma realidade que possibilita o controle ativo das principais grandezas físicas e elétricas do sistema, as ferramentas tradicionalmente utilizadas na análise, planejamento e operação da rede devem ser constantemente atualizadas para atender às novas exigências. Nesse sentido, há atualmente diversos estudos publicados que abordam a inserção dos controladores *FACTS* na formulação do problema de fluxo de carga, que se traduz como a mais popular ferramenta para a análise de sistemas elétricos. Em contrapartida, outras ferramentas igualmente relevantes para outras aplicações, como a operação do sistema, também devem ser atualizadas para contemplar a presença de controladores *FACTS*: é o caso da Estimação de Estados (*EE*), uma aplicação presente na maioria dos centros de controle e operação das redes ao redor mundo (KOLOSOK; TIKHONOV, 2017; VENKATESWARAN; MANOJ, 2015).

A *EE* diz respeito a obter-se a melhor estimativa para o real estado de operação do sistema por meio do processamento estatístico dos erros associados às medidas obtidas por sistemas de monitoramento e supervisão como o *SCADA* (*Supervisory Control and Data Acquisition*), *Phasor Measurement Unit (PMU)*, *Remote Terminal Unit (RTU)*, *Advanced Metering Infrastructure (AMI)*, entre outros. Sua utilização proporciona ao operador uma visão realista e confiável do estado operativo do sistema em tempo real, possibilitando que ações de controle apropriadas sejam tomadas a cada instante (MONTICELLI, 1999; RUBIO-MARROQUÍN; FUERTE-ESQUIVEL; ZAMORA-CÁRDENAS, 2018). Considerando a aplicação da *EE* no contexto de *Smart Grid*, um grande número de informações provenientes da rede passa a ser transmitido aos centros de controle e operação do sistema, exigindo uma grande capacidade de processamento para que ações de controle apropriadas sejam tomadas com segurança e em tempo hábil. Assim, a velocidade e precisão com que os dados e informações provenientes da rede são filtrados e processados torna-se crucial, destacando a importância da *EE*.

Entre as diversas técnicas existentes para realizar a estimação de estados em sistemas de potência, os estimadores baseados no método dos mínimos quadrados ponderados (*MQP*), do inglês *Weighted Least Squares*, foram objeto de pesquisa em diversas publicações ao longo das últimas décadas, tornando-se o tipo de estimador de estado mais popular nos centros de operação e controle ao redor do mundo (MONTICELLI; GARCIA, 1990a; TATSUNO; EJIMA; IWAMOTO, 2008). O algoritmo baseado no método *MQP* tradicional está associado a um grande custo computacional

e de memória, especialmente ao trabalhar com sistemas de grandes dimensões. Verificou-se que os cálculos realizados a cada iteração poderiam ser simplificado ao utilizar aproximações nas matrizes que compõem o algoritmo, reduzindo o custo computacional associado ao método (ABUR; EXPÓSITO, 2004; MONTICELLI, 1999). Além disso, os acoplamentos  $P-\theta$  e  $Q-V$  observados em sistemas de transmissão permitem que o problema de *EE* seja formulado de maneira a computar as contribuições relativas às potências ativa e reativa independentemente. Esse princípio levou à formulação do problema de estimação de estados *MQP* desacoplado-rápido (*EE-DR*) (MONTICELLI; GARCIA, 1990b).

Considerando os trabalhos que envolvem o problema de fluxo de carga e controladores *FACTS* desenvolvidos no grupo de pesquisa que esse trabalho está inserido (PORTELINHA, 2019), as complexidades e dimensões cada vez maiores dos sistemas elétricos ao redor do mundo, a popularização dos controladores *FACTS*, a grande importância atribuída à *EE* para a análise e operação de sistemas de potência em um contexto de *Smart Grid*, as grandes vantagens proporcionadas pela formulação *DR* do problema de *EE* e a escassez de trabalhos publicados que abordam o problema de *EE* em sistemas com *FACTS* via métodos desacoplados, a proposta do presente trabalho de pesquisa diz respeito a desenvolver e implementar um algoritmo estimador de estado baseado na formulação *DR* para sistemas de transmissão que contenham o controlador *FACTS TCSC*.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um estimador de estados para sistemas de transmissão capaz de processar redes elétricas com o controlador *FACTS TCSC*, considerando a formulação desacoplado-rápido do método de mínimos quadrados ponderados do problema de estimação de estados.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- I. formular o problema de estimação de estados para sistemas de transmissão com o controlador *FACTS TCSC*, tendo como base o método *MQP* linearizado;
- II. implementar computacionalmente o estimador de estado linearizado para sistemas com *TCSC* e validar a nova metodologia em sistemas teste do *IEEE*;
- III. formular o problema de estimação de estados para sistemas de potência com o controlador *FACTS TCSC*, tendo como base a formulação *EE-DR*;
- IV. implementar computacionalmente o estimador de estado *DR* para sistemas com *TCSC* e validar a nova metodologia em sistemas teste do *IEEE*.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

Com base no sucesso de trabalhos anteriores envolvendo a inserção de controladores *FACTS* no problema de fluxo de carga (PORTELINHA, 2019), tendo em vista a popularização dos controladores *FACTS* em um contexto de *Smart Grid*, a relevância da *EE* para a operação de sistemas de energia, as grandes vantagens associadas ao método *DR* para a operação de sistemas de grande porte em tempo real, e a escassez de trabalhos científicos publicados que abordam o problema de *EE* em sistemas com *FACTS* via métodos desacoplados, o presente trabalho de pesquisa enseja o desenvolvimento e a implementação de um algoritmo estimador de estado baseado na formulação *DR*, capaz de processar sistemas de transmissão com o controlador *FACTS TCSC*.

### 1.4 CONTRIBUIÇÕES

Entre as contribuições do presente trabalho de pesquisa destacam-se:

- Uma abordagem linearizada para o problema de estimação de estados em sistemas de transmissão com o controlador *FACTS TCSC*. As reatâncias equivalentes dos controladores são inseridas como novas variáveis de estado

para o problema de *EE* linearizado, e são estimadas em conjunto com os ângulos das tensões nas barras;

- Um gerador de grandezas medidas para redes de transmissão com o controlador *FACTS TCSC*, com capacidade de geração de grandezas medidas perfeitas e acrescidas de ruídos normais;
- Uma abordagem não linear para o problema de estimação de estados em sistemas de transmissão com o controlador *FACTS TCSC*. As reatâncias equivalentes dos controladores são inseridas como novas variáveis de estado para o problema de *EE* baseado na formulação *DR*, sendo estimadas em conjunto com as variáveis de estado tradicionais do sistema.

## 1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Nesse capítulo é apresentado um breve contexto sobre as transformações ocorridas nos sistemas de potência ao redor do mundo, incluindo o advento das *Smart Grid* e a popularização dos controladores *FACTS*. Também são apresentados os objetivos (geral e específicos), a justificativa e as contribuições do presente trabalho de pesquisa à comunidade científica.

No capítulo 2 uma revisão da literatura com foco no problema de *EE* é apresentada. A revisão da literatura inclui tópicos como a *EE* em sistemas com controladores *FACTS*, estimação dos parâmetros de sistemas com *FACTS* e metodologias alternativas para tratar o problema de *EE*.

No capítulo 3 está disposta a fundamentação teórica do que norteia o desenvolvimento do trabalho. Inicialmente são apresentadas as principais formulações para o problema *EE*, que inclui a formulação *MQP* tradicional, a *EE-DR* e a linearizada. Por fim são apresentados conceitos referentes aos controladores *FACTS*, suas características funcionais e operacionais.

Com base nas informações levantadas durante a revisão da literatura e com suporte da fundamentação teórica, no capítulo 4 são apresentados os estimadores de estado para sistemas com *FACTS*, desenvolvidos no presente trabalho de pesquisa. O estudo do problema de *EE* para sistemas com *FACTS* se inicia com o desenvolvimento do *TCSC-LSE*, um estimador de estado baseado na formulação linearizada, capaz de processar o modelo linearizado de sistemas de transmissão com



o controlador *TCSC*. Em seguida é apresentado o ponto central da proposta do trabalho, o estimador de estado baseado na formulação *DR*, capaz de processar sistemas de transmissão com o controlador *TCSC*, designado por *TCSC-SE*.

No capítulo 5 as principais simulações realizadas e os resultados obtidos a partir da implementação do *TCSC-LSE* e do *TCSC-SE* são apresentados. A fim de demonstrar o potencial das metodologias propostas, as simulações são conduzidas em três sistemas-teste de transmissão largamente utilizados em estudos na área de sistemas de energia, com portes e características distintas.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões obtidas a partir das simulações, bem como as limitações observadas para cada método. Considerações finais e recomendações para trabalhos futuros são apresentadas ao final deste capítulo.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Nesse capítulo são apresentados os principais conceitos abordados pelos artigos científicos que compõem o portfólio bibliográfico do presente trabalho de pesquisa. Ao todo são reunidos vinte trabalhos científicos publicados entre os anos de 1990 e 2020, organizados nesse documento em subseções de acordo com os temas: (i) Estimação de estados com FACTS; (ii) Estimação dos parâmetros de sistemas com FACTS e; (iii) Formulações alternativas para o problema de estimação de estados generalizado e para o problema de estimação de estados em sistemas com FACTS.

### 2.1 ESTIMAÇÃO DE ESTADOS COM *FACTS*

Em função do atual cenário de mudanças nos sistemas elétricos de todo o mundo, dá-se grande atenção a aspectos relacionados à confiabilidade e segurança na operação de forma a evitar falhas, fazendo com que os sistemas operem da maneira mais eficiente possível. Nesse sentido, com intuito de garantir a operação eficiente e segura, diversas concessionárias investem na instalação de sistemas de monitoramento como o *SCADA*. Espera-se que tais sistemas sejam precisos e confiáveis, o que nem sempre pode ser garantido, especialmente em sistemas de grande porte onde um número considerável de medidas pode estar contaminado por erros grosseiros ou ainda pode estar indisponível. Os estimadores de estados figuram como uma ótima ferramenta para superar essa limitação.

Os controladores *FACTS* podem ser considerados como a tecnologia mais promissora para a tecnologia emergente das *Smart Grid*, permitindo que a rede elétrica passe de um sistema passivo, que apenas transfere energia do ponto “A” ao ponto “B”, para um sistema ativo, que participa diretamente no controle do estado operativos do sistema. Apesar disso, a maioria dos modelos de controladores *FACTS* existentes não são contemplados nas metodologias tradicionalmente empregadas para o controle e análise de sistema de potência, como a *EE*.

Em (GOMATHI; RAMACHANDRAN; KUMAR, 2010) é apresentada a formulação, solução e resultados para o problema de estimação de estados de sistemas que contemplam o dispositivo *Interline Power-Flow Controller (IPFC)*

utilizando o método *MQP* convencional. Desenvolveu-se um modelo de injeção de potências que contempla a ação dos *IPFCs* no fluxo de potência das linhas controladas. Os resultados apontam para boas propriedades de convergência, estendendo as aplicações do algoritmo *MQP* convencional ao incluir a modelagem do *IPFC*.

Em (CHITSAZAN; FADALI; TRZYNADLOWSKI, 2017) é proposta uma extensão para o método *MQP* de forma a contemplar a inserção do dispositivo *Unified Interphase Power Controller (UIPC)*, incorporando no algoritmo as restrições referentes aos limites de operação do *UIPC*. As equações de fluxo de potência ativa e reativa controladas pelo *UIPC* são adicionadas ao algoritmo *MQP* e os ângulos de fase dos *Voltage Source Converters (VSCs)*, responsáveis pelo controle do fluxo de potência ativa e reativa no *UIPC*, são considerados como novas variáveis de estado. Os resultados demonstram que a técnica proposta possui aplicações para determinar os parâmetros de controle desses dispositivos em função de um estado operativo desejado para o sistema.

Em (OKON; WILKOSZ, 2011) os autores estudam os diferentes modos de operação do dispositivo *Unified Power Flow Controller (UPFC)*. Para tanto, o modelo em regime permanente do *UPFC* é implementado no algoritmo *MQP*. O método proposto permite estimar os parâmetros do *UPFC* para três modos de operação distintos: operando na plenitude de suas funcionalidades, como *Static Synchronous Series Compensator (SSSC)* ou como *Static Synchronous Compensator (STATCOM)*. Os diferentes modos de operação refletem em alterações nos parâmetros do *UPFC* a serem considerados no estimador. Os resultados demonstram que a correta identificação do modo de operação do controlador com base nas alterações de seus parâmetros resulta em melhorias no condicionamento do processo de estimação e na precisão dos resultados, além da redução no número de iterações até obter a solução convergida. Grandes mudanças no condicionamento do processo de estimação foram observadas quando o *UPFC* opera como *SSSC*, enquanto grandes mudanças no número de iterações para a solução convergida foram observadas quando o *UPFC* opera como *STATCOM*.

Em (KARAMTA; JAMNANI, 2017) são apresentadas diversas técnicas de *EE* para sistemas que operam em regime permanente e são discutidas formas de incorporar controladores *FACTS* a tais estimadores, com enfoque para o *UPFC*. Além disso, os impactos causados pela inserção de tais dispositivos no algoritmo *MQP*

tradicional e algumas ponderações sobre a *EE* em sistemas dinâmicos também são apresentadas.

Conforme relatado anteriormente, a *EE* constitui-se de uma aplicação importante e fundamental para a operação de sistemas elétricos de potência, utilizada para, a partir de um conjunto de medidas e do modelo da rede, determinar o estado operativo do sistema. Tradicionalmente, a estimação de estados utiliza-se de dados adquiridos por sistemas *SCADA*, cuja taxa de aquisição de dados pode limitar a velocidade de execução do estimador.

Recentemente, o sistema de unidades de medição fasorial (*PMU*) passou a ser implementado de forma a complementar os sistemas tradicionais de aquisição de dados. Trata-se de um sistema de medição sincronizado por *GPS* (*Global Positioning System*) que fornece de 30 a 120 medidas por segundo (a estampa de tempo das medidas obtidas por *PMU* deve coincidir com múltiplos do período nominal da frequência elétrica do sistema, medida a partir do sinal de *GPS*) (PHADKE; THORP, 2008). Ao fornecer dados com maior velocidade, o sistema *PMU* pode melhorar o desempenho de um estimador de estado. Além disso, diferentemente do que ocorre com os estimadores baseados em sistemas *SCADA*, um estimador de estado baseado no sistema *PMU* utiliza as tensões complexas nas barras e fluxos de corrente nas linhas tanto como variáveis de estado quanto como variáveis medidas, reduzindo as não-linearidades envolvidas no problema de estimação.

Nesse sentido, o sistema *PMU* oferece vantagens para a aplicação de estimadores de estado em tempo real. Por outro lado, um sistema que opera *on-line* abre a possibilidade para a ocorrência de ataques cibernéticos, uma vez que a inserção de dados corrompidos no conjunto de medidas fornecido ao estimador de estados pode levar uma falsa estimativa de estado a ser considerada correta quando o processamento de tais dados é feito de maneira simplista.

Em (RUBIO-MARROQUÍN; FUERTE-ESQUIVEL; ZAMORA-CÁRDENAS, 2018), os autores se dedicam a demonstrar como um ataque cibernético pode ser conduzido de forma a corromper um conjunto de medidas associadas aos dispositivos *Thyristor-Controlled Series Capacitor (TCSC)* e *Static VAR Compensator with a Transformer (SVC-T)*, comprometendo a operação segura dos controladores caso ações de controle sejam tomadas com base nas falsas estimativas de estado. Para tanto, um estimador de estado *MQP* é utilizado e os *cyber* ataques são direcionados aos dados obtidos pelos sistemas *SCADA* e *PMU*. Os resultados demonstram as

medidas falsas associadas aos controladores *FACTS* passaram despercebidas durante os processos de identificação de erros grosseiros. Além disso, os resultados mostram como uma falsa estimação dos parâmetros de controle dos controladores *FACTS* pode levar a decisões de controle errôneas, direcionando o sistema a condições de operação instáveis e com consequências possivelmente desastrosas, como a manifestação de ressonância em tais dispositivos.

Em sistemas de potência tradicionais os fluxos de potência ativa e reativa distribuem-se na rede principalmente em função das impedâncias dos ramos. Na ocasião de contingências, cabe ao operador do sistema intervir a fim de redistribuir os fluxos de potência de forma a evitar problemas como perda de estabilidade, elevação nas perdas na transmissão, violações de limites de tensão, limitação da capacidade de transmissão por aquecimento dos condutores, entre outros.

Dessa forma, uma das principais aplicações relacionadas aos controladores *FACTS* diz respeito a controlar eletronicamente os fluxos de potência nos ramos de um sistema, de forma a elevar ou limitar a capacidade de transmissão das linhas controladas, redistribuindo os fluxos de potência em toda a rede.

Em (VENKATESWARAN; MANOJ, 2015) discorre-se sobre o aumento significativo na utilização de controladores *FACTS* para manipular os fluxos de potência em linhas de transmissão de forma a descongestioná-las e otimizar a operação do sistema como um todo. Os autores também relatam a importância da estimação de estados na operação de sistemas de potência em tempo real e apresentam a formulação de um estimador de estado *MQP* que utiliza medidas obtidas do sistema *PMU* e incorpora o controlador *FACTS UPFC*. Os resultados demonstram que o método proposto é capaz de estimar as variáveis de estado em sistemas com *UPFCs* e *PMUs* com eficiência e precisão.

Em (LI; VANFRETTI, 2015) são apresentados modelos simplificados de controladores *FACTS*, inseridos em um algoritmo estimador de estado *MQP* baseado em um sistema *PMU*. Os resultados indicam a necessidade por um maior detalhamento na modelagem dos controladores a fim de obter-se melhores resultados para grandes perturbações. Os resultados mostraram-se satisfatórios para aplicações práticas onde os dispositivos operam em suas regiões lineares.

Em (ZAMORA-CARDENAS; FUERTE-ESQUIVEL, 2012) é apresentada uma abordagem para incorporar controladores *FACTS* e *PMUs* a um algoritmo de estimação de estado *MQP* tradicional. Os controladores *FACTS* considerados são o



*TCSC* e o *UPFC*. A abordagem proposta apresentou melhorias nos valores estimados dos parâmetros dos controladores *FACTS* considerados e também das demais variáveis de estado do sistema. O modelo proposto mostrou-se apropriado tanto para estimar as variáveis de estado dos controladores *FACTS* quanto para estimar os valores de tais variáveis para alcançar um estado operativo desejado.

(PRESADA et al., 2014) apresentam um algoritmo de estimação de estados que utiliza os conjuntos de medidas provenientes dos sistemas *SCADA* e *PMU* e que contempla a inserção dos dispositivos *Static Var Compensator (SVC)* e *TCSC*. Os resultados indicam que a integração das medidas provenientes do sistema *PMU* ao conjunto de medidas do sistema *SCADA* impacta significativamente nas variáveis de estado adicionais introduzidas no problema pelos controladores *FACTS*. Além disso, se as medidas provenientes do sistema *PMU* forem adicionadas em número suficiente, a precisão e a eficiência do estimador são melhoradas. O algoritmo apresentado contribui significativamente na melhoria da precisão da estimação das variáveis de controle dos *FACTS* adicionados ao problema, sem requerer grandes alterações na maneira como o conjunto de medidas é fornecida ao estimador. O método desenvolvido pode ser utilizado para tratar de algumas deficiências ocasionadas pelo conjunto de medidas tradicional, melhorando a observabilidade do sistema, auxiliando no processamento de erros grosseiros e na determinação da topologia da rede.

Em (XU; ABUR, 2003, 2004) os autores apresentam um estimador de estado modificado de forma a incluir modelos detalhados do dispositivo *UPFC*. O modelo do *UPFC* em regime permanente e as restrições de igualdade e desigualdade relativas aos limites operativos do referido controlador são incluídas no algoritmo de otimização baseado no método dos pontos interiores. Além de atuar como um estimador de estado, o método proposto também possui aplicações na etapa de configuração dos parâmetros dos controladores para que se obtenha a condição operativa desejada.

A popularidade dos métodos de *EE* baseados na formulação *MQP* se deve à sua eficiência computacional, não obstante, sabe-se que tais estimadores não são robustos na presença de medidas contaminadas por erros grosseiros. Assim, surge uma nova formulação com maior característica de robustez designado *Weighted Least Absolute Value (WLAV)*, recorrente em publicações que abordam a estimação de estado em sistemas de transmissão convencionais nos últimos anos.

Em (RAKPENTHAI et al., 2010) é proposto um método de estimação de estado para sistemas com *UPFCs*, formulado como um problema de otimização não linear, com restrições de igualdade e desigualdade não lineares, baseado no critério *WLAV*. Os autores propõem a utilização do método primal-dual de pontos interiores para solucionar o problema de otimização resultante. Os resultados indicam que o algoritmo proposto é capaz de fornecer uma solução precisa e robusta para o problema de *EE* em sistemas com *UPFCs*, podendo também ser aplicado a sistemas com outros tipos de controladores *FACTS*.

O monitoramento e controle de sistemas de potência em tempo real já está implementado em diversos países, fazendo da *EE* uma ferramenta básica e de grande importância para esse tipo de aplicação. Por se tratar de uma ferramenta *on-line*, é fundamental que os algoritmos de *EE* sejam capazes de estimar as variáveis de estado do sistema com precisão, mas também que sejam eficientes computacionalmente, ou seja, que sejam capazes de desempenhar sua função com baixo consumo de memória e custo computacional (ROY; MOHAMMED, 1997).

Os algoritmos de *EE* baseados na formulação *MQP* tradicional são confiáveis e precisos, porém muitas vezes o tempo e esforço computacionais exigidos para sua execução limitam sua aplicabilidade em tempo real, especialmente ao tratar com sistemas de grande porte. A necessidade de aliar precisão e eficiência levou ao desenvolvimento da formulação *EE-DR*, baseada no fluxo de carga desacoplado-rápido (*FCDR*).

A formulação *EE-DR* possui diversas vantagens quando comparado ao método *MQP* tradicional, especialmente no que concerne ao tempo necessário para execução, confiabilidade, simplicidade e consumo de memória. Tais características são alcançadas em função do desacoplamento das variáveis de potência ativa e reativa, além de aproximações feitas na matriz ganho e na matriz Jacobiana do método *MQP* (TATSUNO; EJIMA; IWAMOTO, 2008).

A formulação do algoritmo *EE-DR* básico é apresentada em (MONTICELLI; GARCIA, 1990a). Os autores também apresentam uma nova abordagem para o desacoplamento ativo/reactivo no problema de *EE*, em um procedimento em dois passos para resolver as mesmas equações do método *MQP* convencional.

Em sistemas com relações  $r/x$  elevadas, a formulação *EE-DR* pode apresentar problemas de convergência. (TATSUNO; EJIMA; IWAMOTO, 2008)

propõem um método para melhorar os problemas de convergência do método *MQP-DR*, ao introduzir uma sub-rotina para cálculo de um multiplicador ótimo responsável por melhorar as características de convergência do método.

Em (ROY; MOHAMMED, 1997) é apresentada uma metodologia de normalização das funções do modelo de medição tradicional de forma que os elementos fora da diagonal principal das matrizes ganho e Jacobiana não sejam zerados, eliminando assim os efeitos causados por relações  $r/x$  elevadas ou baixas, tornando assim o algoritmo *EE-DR* mais robusto e confiável.

## 2.2 ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SISTEMAS COM *FACTS*

Em um estimador de estados *MQP* tradicional, os elementos passivos do sistema são modelados como quadripolos, desconsiderando-se a influência do regime de operação do sistema e condições climáticas nos parâmetros da rede, o que pode refletir em erros significativos no processo de estimação de estados, uma vez que alguns dos parâmetros do sistema podem variar em função de condições climáticas e operativas em um determinado instante.

Com o desenvolvimento do sistema de medição fasorial sincronizada (via *PMUs*), pôde-se desenvolver estimadores de estado mais eficientes, melhorando também a identificação dos parâmetros das linhas de transmissão, inclusive parâmetros de controladores *FACTS*. Ao considerar os *FACTS* como elementos ativos, a cada vez em que um sinal de controle for enviado a esses dispositivos seus parâmetros serão alterados, o que só pode ter alcançado em uma operação *on-line*, já que os parâmetros relacionados a elementos passivos (como linhas de transmissão e transformadores) variam com menor frequência.

Assim, a validação dos dados medidos remotamente é de importância crucial, especialmente em linhas de transmissão longas. Em (BARTOLOMEY et al., 2012), os autores apresentam uma metodologia para a melhoria na validação de dados medidos em tempo real e na avaliação dos parâmetros de linhas longas em sistemas elétricos de potência. A base para a validação dos dados se dá em dois estágios, incluindo a atualização dos parâmetros das linhas de transmissão que dependem de carga e do clima, bem como a eliminação de dados incorretos. Os resultados demonstram que o

procedimento de processamento de dados em dois estágios proposto possui grande eficiência, tanto para a estimação de parâmetros do sistema e de controladores *FACTS* quanto para a identificação de parâmetros das linhas de transmissão.

Em (KOLOSOK; TIKHONOV, 2017) o problema de *EE* e de estimação de parâmetros em sistemas de potência é abordado a fim de desenvolver estimadores de estado que contemplem os dispositivos *SVC* e *TCSC*. Os modelos desenvolvidos foram testados utilizando medidas reais obtidas do sistema *SCADA*. Os resultados indicam que a inclusão de modelos equivalentes dos controladores *TCSC* e *SVC* requer alterações mínimas nos algoritmos de *EE* baseados no método *MQP* tradicional, sem impactar significativamente na sua eficiência. Os algoritmos desenvolvidos demonstraram bom desempenho e convergência, permitindo uma maior precisão e detalhamento na modelagem do sistema sob análise.

### 2.3 FORMULAÇÕES ALTERNATIVAS PARA O PROBLEMA DE ESTIMAÇÃO DE ESTADOS

Os algoritmos de *EE* tradicionais geralmente estão associados a elevados custos computacionais e a etapa de construção da matriz Jacobiana responde por grande parte desse custo de processamento, especialmente para sistemas de grandes dimensões. Portanto busca-se por formas de tornar os algoritmos de *EE* mais eficientes pelo desenvolvimento de metodologias alternativas para a construção da matriz Jacobiana.

Em (NOR; JEGATHEESAN, 2010), os autores apresentam uma nova metodologia para a construção da matriz Jacobiana em estimadores de estado de sistemas de potência com o controlador *UPFC*. A metodologia proposta, designada *State Estimation Using Constructed Jacobian (SECJ)*, pode ser facilmente incorporada à formulação do problema de estimação de estados baseado no método de *Newton-Raphson* puro. A matriz Jacobiana resultante é exatamente igual àquela formada pela metodologia convencional e o estimador resultante é capaz de estimar os parâmetros do *UPFC* para condições normais de operação, e também estimar o valor de tais parâmetros para alcançar as especificações de controle desejadas. A utilização do *SECJ* mostrou-se eficaz, com redução de 25% no tempo computacional quando

comparado ao estimador de estado tradicional baseado no método de *Newthson-Raphson*.

(ALVARADO; TINNEY, 1990) propõem modificações no método de *EE* baseado na formulação *MQP* linearizada para sistemas elétricos de potência. A ideia central do método proposto consiste em organizar a matriz aumentada da formulação *Hatchel* em uma estrutura de blocos de submatrizes, de forma que sua topologia se torne similar à das matrizes Y-barra e Jacobiana do fluxo de carga convencional. As propriedades de esparsidade dessas matrizes são bem compreendidas, assim, o método proposto melhora a robustez do estimador, sem comprometer sua velocidade. Os autores concluem que a abordagem proposta pode ser utilizada em formulações acopladas ou desacopladas, sendo que o único requerimento para obter eficiência no método é ter habilidade ao programar operações que envolvem matrizes e vetores esparsos.

Na última década a geração de energia por fontes renováveis se tornou tendência em diversos países ao redor do mundo. Assim, novas centrais geradoras passaram a ser conectadas aos sistemas elétricos, e a geração distribuída, bem como a presença de grandes centrais geradoras baseadas em energias renováveis, se tornaram realidade nos sistemas de potência de diversos países. Usualmente as grandes centrais geradoras como fazendas eólicas e fotovoltaicas são associadas a um regime de geração imprevisível e estão localizadas a grandes distâncias dos centros de consumo, como é o caso das centrais *off-shore*. Nesse sentido, a utilização de sistemas de corrente contínua em alta tensão baseados em VSCs torna-se uma solução viável para a integração de tais centrais às redes de transmissão convencionais.

Com intuito de abordar a integração dos sistemas de energia CA-CC às aplicações de controle de sistemas de transmissão, (MARTÍNEZ-PARRALES; FUERTE-ESQUIVEL, 2018) propõem uma nova abordagem para a estimação de estado e análise de medidas contaminadas em sistemas de transmissão com redes multiterminais de corrente contínua em alta tensão baseadas em VSCs (do inglês, *Multi-terminal High Voltage Direct Current Transmission Based on VSC*). O método proposto consiste em integrar redes VSC-MTDC a um algoritmo de estimação de estado baseado na formulação *Hatchel*, utilizando medidas provenientes dos sistemas SCADA e PMU. O processo de estimação de estado é conduzido de maneira unificada, de forma que as grandezas associadas à rede CC, ciclos de trabalho dos

conversores CC-CC e parâmetros de controle dos VCSs são estimados simultaneamente com as tensões nodais da rede CA. Além disso, é apresentada uma nova abordagem para análise de erros grosseiros, conduzida ao longo do processo iterativo sem alterar o nível de redundância do conjunto de medidas. Os resultados demonstram que o método proposto é capaz de estimar as variáveis de estado do sistema com grande precisão e com ótimas propriedades de convergência, mesmo com a presença de erros grosseiros no conjunto de medidas fornecido ao estimador.

Em (CHITSAZAN; FADALI; TRZYNADLOWSKI, 2020), um estimador de estado robusto modificado designado *Spanning Tree Maximum Exponential Absolute Value (ST-MEAV)*, que utiliza a função *Laplace Kernel* baseada no *maximum correntropy criterion (MCC)* combinada a um solucionador linear rápido para contornar problemas relacionados a eliminação de erros grosseiros no processo de *EE* de sistemas elétricos de grandes dimensões com os controladores *Interphase Power Controller (IPC)* e *UIPC*. Os resultados demonstram que em sistemas de grande escala, o método proposto apresenta grande precisão, com eficiência comparável aos estimadores baseados no método, mesmo na presença de erros grosseiros. Os autores apresentam ainda uma versão modificada do *ST-MEAV* designada por *ST0-MEAV*, em que as características de esparsidade da matriz Jacobiana de medidas são modificadas a fim de melhorar a eficiência computacional do método.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A Estimação de Estados (*EE*) em sistemas elétricos foi inicialmente proposta por Fred C. Schweppe no ano de 1970, no trabalho intitulado *Power System Static-State Estimation* (SCHWEPPE, 1970; SCHWEPPE; ROM, 1970; SCHWEPPE; WILDES, 1970). Desde então, diversos pesquisadores dedicaram-se à pesquisa na área, de forma que hoje há milhares de trabalhos publicados relacionados ao tema e às suas aplicações em sistemas elétricos de potência. Se comparados aos sistemas atuais, as redes contemporâneas à proposição inicial da *EE* eram relativamente simples e possuíam dimensões reduzidas. Assim, era possível formular o problema de *EE* com base apenas na ponderação estatística de medidas obtidas de sistemas com topologias precisamente conhecidas, sem considerar a detecção, correção e/ou eliminação de quaisquer medidas errôneas e, mesmo sob tais condições, a solução para o problema não era obtida de forma trivial (MONTICELLI, 1999).

Com o passar dos anos, diversos fatores passaram a ser levados em conta na formulação do problema de *EE*, como o fato de que nem sempre a topologia dos sistemas é conhecida com precisão, bem como a possibilidade da existência de erros e imprecisões nos sistemas de medição adotados. Isso fez com que os estimadores de estado se tornassem mais precisos e robustos, tornando a *EE* uma aplicação crítica para a operação dos sistemas de potência atuais. Tradicionalmente a *EE* é conduzida com base na modelagem barra/ramo, largamente empregada em estudos de sistemas de energia, de forma que a partir de um processamento estatístico de um conjunto de medidas e da topologia da rede, o estimador é capaz de obter uma estimativa para as variáveis de estado do sistema.

Nesse contexto, ao abordar a *EE* no nível acadêmico, é fundamental que sejam utilizadas formas de simulação para gerar o conjunto de medidas a ser fornecido para o estimador. Em geral, a ferramenta de fluxo de carga associada a um gerador de ruídos aleatórios é utilizada para este fim. Além disso, a proposta do presente trabalho de pesquisa se propõe a expandir as aplicações da *EE* a fim de englobar também a tecnologia emergente dos *Flexible AC Transmission Systems*.

Nesse capítulo é apresentada a fundamentação teórica do presente trabalho de pesquisa. Para tanto, são abordados os principais conceitos que balizam os estudos na área de sistemas de energia, as principais aplicações nas áreas de análise e operação de sistemas elétricos de potência e conceitos relevantes relacionados aos



controladores *FACTS*, com ênfase no controlador *Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)*.

### 3.1 ESTIMAÇÃO DE ESTADOS

A estimação de estados fornece uma estimativa do estado mais provável de operação do sistema, operando como um filtro entre as medidas obtidas da rede e as ações de controle apropriadas, que dependem de dados que reflitam com boa aproximação as condições de operação do sistema em determinado instante. Assim, a principal função da *EE* é fornecer estimativas para as variáveis de estado do sistema a partir de um conjunto redundante de medidas. Sua capacidade inerente de processamento de erros permite fornecer uma base de dados mais confiável ao operador, proporcionando uma operação em tempo-real mais segura e apropriada. Usualmente, as seguintes funções fazem parte de um estimador de estado (ABUR; EXPÓSITO, 2004):

- Processador de topologia: reúne e processa as informações referentes ao estado operativo de disjuntores e seccionadoras a fim de compor o diagrama unifilar do sistema;
- Análise de observabilidade: determina se o conjunto de medidas disponíveis é suficiente para obter uma solução para o problema de estimação de estados do sistema, além de identificar ramos não observáveis e ilhamentos;
- Solução da estimação de estado: com base no conjunto de medidas disponíveis e dos resultados obtidos pelo processador de topologia e análise de observabilidade, fornece uma estimativa ótima para as variáveis de estado do sistema. Usualmente, o conjunto de variáveis de estado de um sistema de potência é formado pelas tensões complexas em todas as barras;
- Processamento de erros grosseiros: detecta a existência de erros grosseiros no conjunto de medidas obtidas do sistema. Caso haja redundância suficiente no plano de medição, as medidas contaminadas por erros são eliminadas;
- Processamento de erros estruturais e de parâmetros: estima diversos parâmetros da rede a fim de detectar erros estruturais na configuração do sistema, desde que haja redundância suficiente no plano de medição.

### 3.1.1 Premissas e modelo de medição

O estado operativo de um sistema de potência pode ser determinado se a topologia da rede e as tensões complexas em todas as barras do sistema sejam conhecidos, assim, um sistema que opera em regime permanente é completamente especificado pelas tensões complexas nas barras. De maneira geral, o vetor de variáveis de estado de um sistema de potência é dado por:

$$\mathbf{x} = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \cdots \quad \theta_n \quad V_1 \quad V_2 \quad \cdots \quad V_n] \quad (3.1)$$

onde  $V$  e  $\theta$  são as magnitudes e fases de tensão nas barras e  $n$  é o número de barras que compõem o sistema.

O estimador de estado fornece uma estimativa para o vetor de variáveis de estado  $\mathbf{x}$ , com base em uma combinação de medidas e pseudo-medidas, caracterizadas como:

#### 1. Medidas

- Magnitude e fase de tensão nas barras;
- Fluxos de potência ativa nos ramos e injeções de potência ativa nas barras;
- Fluxos de potência reativa nos ramos e injeções de potência reativa nas barras;
- Magnitudes dos fluxos de corrente nos ramos;
- Posição dos *taps* e defasagens angulares proporcionados por transformadores.

#### 2. Pseudo-medidas

- Magnitudes e fases de tensão especificadas nas barras;
- Fluxos de potência ativa e reativa especificados nos ramos;
- Limites de injeções de potência ativa e reativa nas barras;
- Magnitudes dos fluxos de corrente especificados nos ramos;
- Limites dos *taps* e defasagens angulares proporcionados por transformadores.

Nos sistemas de potência reais, o conjunto de medidas é obtido e transmitido aos centros de controle e operação por sistemas de supervisão e aquisição de dados

como o *Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)*. O vetor de medidas de um sistema monitorado pelo sistema SCADA inclui: (i) fluxos de potência ativa e reativa em linhas de transmissão e transformadores; (ii) geração e consumo de potência ativa e reativa nas barras; (iii) módulos de tensão nas barras; (iv) em alguns casos, módulo do fluxo de corrente nas linhas e injeção de corrente nas barras. A fim de obter-se as injeções de potência nas barras, as pseudo-medidas de cargas nas barras são utilizadas em conjunto com os dados do sistema SCADA (KOLOSOK; TIKHONOV, 2017).

A utilização de pseudo-medidas é uma prática comum na *EE*. Perdas de telemetria, medidas com erros grosseiros recusadas ou falhas de naturezas diversas podem fazer com que algumas áreas do sistema se tornem inobserváveis. Nesse caso, pseudo-medidas podem ser geradas a partir de um histórico de medidas ou previsões de carga e despacho de curto prazo. De maneira geral, grandes variâncias são atribuídas às pseudo-medidas, podendo também ser definidas como medidas críticas de acordo com sua natureza ou à critério do operador (ABUR; EXPÓSITO, 2004).

Além disso, existem barras passivas, também referidas como barras de passagem ou barras de injeção nula, nas quais não há carga ou geração local de potência. Dessa forma, sabe-se que a injeção de potência nessas barras é nula, sem a necessidade de medir-se diretamente tais grandezas. Para estes casos, medidas de injeções de potência ativa e reativa iguais à zero e livres de erros de medição são utilizadas com intuito de prover maior redundância ao conjunto de medidas fornecido ao estimador de estado. Tais medidas são referidas como medidas virtuais (ABUR; EXPÓSITO, 2004).

De maneira geral, o vetor de medidas fornecido a um estimador de estado é dado por:

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{flow} & \mathbf{Q}_{flow} & \mathbf{P}_{inj} & \mathbf{Q}_{inj} & \mathbf{V}_{mag} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

onde  $\mathbf{P}_{flow}$  e  $\mathbf{Q}_{flow}$  correspondem às medidas de fluxo de potência ativa e reativa nos ramos,  $\mathbf{P}_{inj}$  e  $\mathbf{Q}_{inj}$  correspondem às medidas de injeção de potência ativa e reativa nas barras e  $\mathbf{V}_{mag}$  corresponde às medidas dos módulos das tensões nas barras.

Tratando-se de medidas obtidas por um sistema de supervisão real, o vetor  $\mathbf{z}$  que representa o conjunto de medidas pode ser expresso matematicamente como:

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ h_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ h_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_m \end{bmatrix} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \mathbf{e} \quad (3.3)$$

onde:

$\mathbf{h}(\mathbf{x})$  é o vetor de funções não-lineares que relaciona as medidas às variáveis de estado do vetor  $\mathbf{x}$ ;

$\mathbf{e}$  é o vetor dos erros das medidas. Assume-se que os elementos de  $\mathbf{e}$  possuam distribuição normal Gaussiana e média zero (MONTICELLI, 1999).

Em função das propriedades estatísticas dos erros associados às medidas, tomam-se como verdadeiras as seguintes premissas:

- $E(e_i) = 0, i = 1, 2, \dots, m;$
- $E(e_i e_j) = 0, i = 1, 2, \dots, m.$

onde  $E(e_i)$  denota o valor esperado de  $e_i$ .

Os erros associados às medidas são independentes entre si, e a matriz de covariância dos erros das medidas é dada pela matriz diagonal  $\mathbf{R}$ .

$$\text{Cov}(\mathbf{e}) = E[\mathbf{e}\mathbf{e}^T] = \mathbf{R} = \text{diag}\{\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_m^2\} \quad (3.4)$$

onde  $\sigma_m$  corresponde ao desvio padrão da  $m$ -ésima medida, calculado a fim de fornecer uma medida da precisão do medidor correspondente empregado ou especificado de forma a suprir algum critério de engenharia (ABUR; EXPÓSITO, 2004; GOMATHI; RAMACHANDRAN; KUMAR, 2010; MONTICELLI, 1999).

O modelo de medição não linear apresentado em (3.3) define o problema de *EE* para sistemas de potência, cuja solução retorna a melhor estimativa para o vetor de variáveis de estado  $\mathbf{x}$ . Usualmente esse problema é resolvido pelo método *MQP*, do inglês *Weighted Least Squares (WLS)*, cuja formulação será apresentada com maior detalhe nas próximas seções.

### 3.1.2 Gerador de Grandezas Medidas

O intuito do presente estudo é desenvolver uma nova metodologia que permita inserir os controladores *FACTS* em um algoritmo de estimação de estado baseado na formulação *EE-DR*. Assim, o estimador proposto é implementado utilizando sistemas-teste já conhecidos e bem difundidos no meio acadêmico, possibilitando verificar se os resultados obtidos são coerentes em função do comportamento esperado para os referidos sistemas. O desenvolvimento do trabalho se dá exclusivamente por meio de simulações e análises computacionais, incluindo a obtenção do conjunto de medidas a ser inserido no estimador. Em função das relações complexas que se estabelecem entre as variáveis de estado, fluxos e injeções de potência nas barras de um sistema de potência tradicional, recorre-se a métodos que permitam gerar um conjunto de medidas coerente e confiável, a partir do qual as metodologias de *EE* possam ser validadas e testadas.

De maneira geral, o método adotado para obter o conjunto de medidas para estudos em *EE* é o fluxo de carga (*FC*), cuja solução retorna um conjunto “perfeito” de grandezas medidas para uma condição operativa especificada. Erros aleatórios são então inseridos no conjunto perfeito de medidas, a fim de simular o que ocorre em sistemas de potência reais, que são monitorados por equipamentos não ideais. Tradicionalmente, o fluxo de carga constitui a aplicação mais utilizada nas áreas de operação, planejamento e proteção de sistemas elétricos de potência, possibilitando identificar desvios de tensão e sobrecargas, além de permitir que o engenheiro de planejamento simule diferentes cenários futuros considerando projeções de crescimento de demanda (EXPÓSITO; CONEJO; CAÑIZARES, 2011).

A solução de um fluxo de carga se dá em dois estágios. No primeiro estágio, a solução de um conjunto de equações não lineares permite obter as tensões complexas em todas as barras do sistema, ou seja, no primeiro estágio são obtidas as variáveis de estado para uma condição operativa especificada. No segundo estágio, de posse das variáveis de estado obtidas previamente, são calculados os valores de interesse como fluxos de potência ativa e reativa em linhas de transmissão e equipamentos, injeções de potência ativa e reativa nas barras, perdas ôhmicas, entre outros. Entre os principais métodos empregados na solução do problema de fluxo de carga destaca-se o método de *Newton-Raphson*, largamente documentado e empregado em diversos trabalhos científicos já publicados, bem como na maioria dos

centros de controle e operação de sistemas de potência ao redor do mundo. A formulação detalhada do problema de fluxo de carga resolvido pelo método de *Newton-Raphson* tradicional, além das versões desacopladas e também na sua versão linearizada podem ser encontradas em (MONTICELLI, 1983) e (EXPÓSITO; CONEJO; CAÑIZARES, 2011).

De acordo com a proposta do presente trabalho de pesquisa, o método adotado para o gerador de grandezas medidas do estimador de estado com *FACTS* proposto é o Fluxo de Carga Desacoplado-Rápido (*FCDR*). Conforme mencionado anteriormente, o conjunto completo de variáveis de estado é suficiente para especificar o sistema como um todo, ou seja, a partir da solução do *FCDR* quaisquer outras grandezas do sistema podem ser calculadas, como fluxos de corrente e potências nas linhas de transmissão e equipamentos, bem como injeções de potência nas barras.

### 3.1.2.1 Funções de medição

Considerando um sistema de potência real monitorado pelo sistema *SCADA*, de acordo com o modelo de medição do estimador de estado expresso em (3.3), há um conjunto de equações não lineares  $\mathbf{h}(\mathbf{x})$  que relaciona as grandezas que compõem o vetor de medidas  $\mathbf{z}$  ao vetor de variáveis de estado  $\mathbf{x}$ . A essas equações atribui-se o nome de funções de medição, e em um estimador de estado são utilizadas na obtenção de uma estimativa para as grandezas monitoradas da rede com base nas variáveis de estado estimadas (GOMATHI; RAMACHANDRAN; KUMAR, 2010).

Em um primeiro momento, as funções de medição em conjunto com o plano de medição são utilizadas para gerar o conjunto perfeito de medidas do sistema sob análise. A partir da solução do fluxo de carga, os valores calculados para as variáveis de estado do sistema são aplicados às funções de medição para que as medidas livres de erros das injeções e fluxos de potência ativa e reativa no sistema possam ser obtidas. Em um segundo momento, ao longo do processo iterativo do problema de *EE*, as funções de medição são utilizadas no cálculo das medidas a partir das variáveis de estado estimadas, o que será discutido mais adiante.

Levando em consideração o vetor de medidas da expressão (3.2), as funções não lineares que relacionam as variáveis de estado do sistema às medidas de injeção de potência ativa e reativa na barra  $k$  são dadas por (MONTICELLI, 1983):

$$P_k = V_k \sum_{m=1}^{nb} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (3.5)$$

$$Q_k = V_k \sum_{m=1}^{nb} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (3.6)$$

As expressões que relacionam as variáveis de estado às medidas de fluxos de potências ativa e reativa nos equipamentos do sistema são listadas a seguir (EXPÓSITO; CONEJO; CAÑIZARES, 2011).

- Fluxos de potência ativa em linhas de transmissão:

$$P_{km} = V_k^2 g_{km} - V_k V_m (g_{km} \cos \theta_{km} + b_{km} \sin \theta_{km}) \quad (3.7)$$

$$P_{mk} = V_m^2 g_{km} - V_m V_k (g_{km} \cos \theta_{mk} + b_{km} \sin \theta_{mk}) \quad (3.8)$$

- Fluxos de potência reativa em linhas de transmissão:

$$Q_{km} = -V_k^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) - V_k V_m (g_{km} \sin \theta_{km} - b_{km} \cos \theta_{km}) \quad (3.9)$$

$$Q_{mk} = -V_m^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) - V_m V_k (g_{km} \sin \theta_{mk} - b_{km} \cos \theta_{mk}) \quad (3.10)$$

- Fluxos de potência ativa em transformadores de *tap* variável:

$$P_{km} = (a_{km} V_k)^2 g_{km} - (a_{km} V_k) V_m (g_{km} \cos \theta_{km} + b_{km} \sin \theta_{km}) \quad (3.11)$$

$$P_{mk} = V_m^2 g_{km} - (a_{km} V_k) V_m (g_{km} \cos \theta_{mk} + b_{km} \sin \theta_{mk}) \quad (3.12)$$

- Fluxos de potência reativa em transformadores de *tap* variável:

$$Q_{km} = -(a_{km} V_k)^2 b_{km} - (a_{km} V_k) V_m (g_{km} \sin \theta_{km} - b_{km} \cos \theta_{km}) \quad (3.13)$$

$$Q_{mk} = -V_m^2 b_{km} - (a_{km} V_k) V_m (g_{km} \sin \theta_{mk} - b_{km} \cos \theta_{mk}) \quad (3.14)$$

- Fluxos de potência ativa em transformadores defasadores:



$$P_{km} = V_k^2 g_{km} - V_k V_m \left[ g_{km} \cos(\theta_{km} + \varphi_{km}) + b_{km} \sin(\theta_{km} + \varphi_{km}) \right] \quad (3.15)$$

$$P_{mk} = V_m^2 g_{km} - V_k V_m \left[ g_{km} \cos(\theta_{mk} - \varphi_{km}) + b_{km} \sin(\theta_{mk} - \varphi_{km}) \right] \quad (3.16)$$

- Fluxos de potência reativa em transformadores defasadores:

$$Q_{km} = -V_k^2 b_{km} - V_k V_m \left[ g_{km} \sin(\theta_{km} + \varphi_{km}) - b_{km} \cos(\theta_{km} + \varphi_{km}) \right] \quad (3.17)$$

$$Q_{km} = -V_m^2 b_{km} - V_k V_m \left[ g_{km} \sin(\theta_{mk} - \varphi_{km}) - b_{km} \cos(\theta_{mk} - \varphi_{km}) \right] \quad (3.18)$$

Ao considerar as particularidades pertinentes a cada um dos equipamentos do sistema, obtêm-se a expressão generalizada para os fluxos de potência ativa e reativa em linhas de transmissão, transformadores em fase e defasadores, conforme apresentado a seguir:

$$P_{km} = (a_{km} V_k)^2 g_{km} - (a_{km} V_k) V_m \left[ g_{km} \cos(\theta_{km} + \varphi_{km}) + b_{km} \sin(\theta_{km} + \varphi_{km}) \right] \quad (3.19)$$

$$Q_{km} = -(a_{km} V_k)^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) - (a_{km} V_k) V_m \left[ g_{km} \sin(\theta_{km} + \varphi_{km}) - b_{km} \cos(\theta_{km} + \varphi_{km}) \right] \quad (3.20)$$

De acordo com o tipo de equipamento, as variáveis  $a_{km}$ ,  $\varphi_{km}$  e  $b_{km}^{sh}$  em (3.19) e (3.20) assumem valores particulares, conforme apresentado no QUADRO 1.

QUADRO 1 - PARÂMETROS PARA OS DIFERENTES EQUIPAMENTOS DO SISTEMA NAS EXPRESSÕES GERAIS DOS FLUXOS DE POTÊNCIA

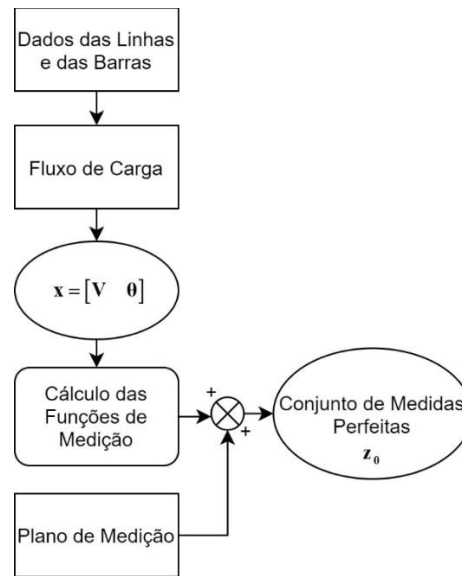
Equipamento	$a_{km}$	$\varphi_{km}$	$b_{km}^{sh}$
Linha de transmissão	1	0	$b_{km}^{sh}$
Transformador em fase	$a_{km}$	0	0
Transformador defasador puro	1	$\varphi_{km}$	0
Transformador defasador	$a_{km}$	$\varphi_{km}$	0

FONTE: Adaptado de (HAFFNER, 2007)

Assim, respeitando-se os parâmetros do QUADRO 1 as expressões (3.19) e (3.20) podem ser utilizadas para o cálculo dos fluxos de potência ativa e reativa em linhas de transmissão, transformadores em fase e defasadores. Para calcular os fluxos de potência no sentido contrário basta inverter os subíndices  $k$  e  $m$  em tais expressões.

O fluxograma apresentado na FIGURA 3.1 ilustra o procedimento adotado na determinação do vetor perfeito de medidas  $\mathbf{z}_0$ .

FIGURA 3.1 - FLUXOGRAMA DO GERADOR DE GRANDEZAS MEDIDAS PERFEITAS



FONTE: O autor (2020).

Conforme ilustrado na FIGURA 3.1, a partir de um plano de medição pré-estabelecido e do resultado do fluxo de carga aplicado às funções de medição é obtido o vetor perfeito de medidas  $z_0$ .

### 3.1.2.2 Gerador de erros aleatórios

A fim de simular os erros intrínsecos ao processo de medição, comuns em sistemas de transmissão reais, erros aleatórios devem ser inseridos ao conjunto perfeito de medidas contido no vetor  $z_0$ . Conforme apresentado na Seção 3.1.1, considera-se que os erros de medição possuem distribuição normal gaussiana e média zero. Devido à natureza e características dos medidores utilizados, cada medida está associada a uma variância  $\sigma^2$ , cujo valor é computado na matriz de covariância dos erros das medidas  $\mathbf{R}$ . Em suma, quanto menor a variância produzida por um medidor, maior seu grau de precisão, assim o elemento correspondente em  $\mathbf{R}$  atribuirá maior peso a tal medida.

Em função do desvio associado a cada medidor, os erros de medição podem ser classificados em três grupos (COELHO; PORTELINHA; LOURENÇO, 2016):

- Erro extremo:  $|erro| > 20\sigma$ ;
- Erro grosseiro:  $3\sigma < |erro| < 20\sigma$ ;
- Ruído Normal:  $|erro| < 3\sigma$ .

Erros extremos são filtrados em uma etapa anterior ao processo de estimação de estado, em uma pré-análise dos dados. São detectados por meio de técnicas de detecção de erros não-gaussianos, usualmente após o processo de estimação de estado. Dependendo do nível de redundância do plano de medição, a medida contaminada por erro grosseiro é eliminada do conjunto de medidas e o processo de estimação é conduzido novamente. Por fim, o ruído normal é decorrente das não-idealidades dos medidores e transdutores de medidas.

Para efeitos práticos, o ruído normal está principalmente associado às imperfeições dos equipamentos de medição como transformadores de corrente (*TCs*) e transformadores de potencial (*TPs*), mas também podem ser decorrentes da precisão dos medidores, calibração dos transdutores analógicos/digitais, falhas no enlace entre a subestação e o centro de controle, desequilíbrio entre fases, entre outros (ALBERTINI, 2010). Entre as três classificações apresentadas, os erros que se enquadram nessa classificação possuem menor magnitude, porém estão presentes em praticamente todas as medidas obtidas do sistema. Dessa forma, os erros aleatórios a serem inseridos no gerador de erros proposto se enquadram nessa classificação. De acordo com o modelo de medição apresentado em 3.1.1, os valores das grandezas medidas são obtidos pela adição de incertezas aos elementos do vetor perfeito de medidas  $\mathbf{z}_0$  (COELHO; PORTELINHA; LOURENÇO, 2016).

O gerador de erros proposto no presente trabalho se baseia no método apresentado por (FREUND, 2006), no qual os ruídos são simulados para cada uma das medidas, considerando que sejam independentes entre si, assim têm-se:

$$\mathbf{z} = |\mathbf{z}_0| + (3\sigma_z)\alpha \quad (3.21)$$

$$(3\sigma_z) = pr \times |\mathbf{z}_0| + fe \quad (3.22)$$

onde:

$\sigma_z$  é o desvio padrão associado a uma determinada medida;

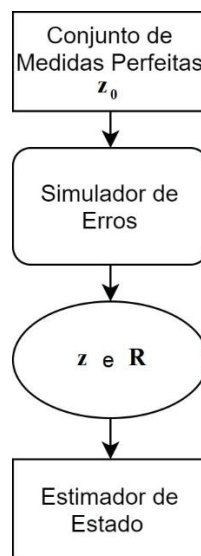
$|\mathbf{z}_0|$  é o módulo do vetor perfeito de medidas;

$pr$  é a precisão do medidor, usualmente  $0,01 \leq pr \leq 0,02$ ;

$fe$  é o fundo de escala do medidor, usualmente  $0 \leq fe \leq 0,035$ ;  
 $\alpha$  é uma variável aleatória  $N(0,1)$ .

Para cada elemento de  $\mathbf{z}_0$  um ruído diferente é simulado, influenciado pela natureza do medidor (precisão e fundo de escala) e por um número aleatório de distribuição normal. A FIGURA 3.2 apresenta o fluxograma do gerador de erros aleatórios utilizado no presente trabalho de pesquisa.

FIGURA 3.2 - FLUXOGRAMA DO GERADOR DE ERROS ALEATÓRIOS



FONTE: O autor (2020).

Vale ressaltar que o conjunto de medidas perfeitas contido no vetor  $\mathbf{z}_0$  pode ser obtido a partir da solução do problema de fluxo de carga, independentemente do método empregado, seja método de *Newton-Raphson* em sua versão completa, desacoplada ou linearizada.

### 3.1.3 Formulação *MQP* do problema de *EE*

Entre as diversas técnicas existentes para realizar a estimação de estado, o método *MQP* é o mais utilizado nos centros de controle e operação ao redor do mundo. A partir do modelo de medição expresso em (3.3) e da matriz de covariância

dos erros das medidas expressa em (3.4), o estimador *MQP* objetiva minimizar a seguinte função objetivo (ABUR; EXPÓSITO, 2004):

$$J(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m \left( \frac{z_i - h_i(\mathbf{x})^2}{R_{ii}} \right) = [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})]^T \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})] \quad (3.23)$$

A fim de satisfazer as condições de otimalidade de primeira ordem, no ponto de mínimo têm-se:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \frac{\partial J(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = -\mathbf{H}^T(\mathbf{x}) \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})] = 0 \quad (3.24)$$

onde  $\mathbf{g}(\mathbf{x})$  é o gradiente de  $J(\mathbf{x})$  e  $\mathbf{H}(\mathbf{x})$  é a matriz Jacobiana de medidas dada por:

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}) = \left[ \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right] = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{P}_{flow}}{\partial \boldsymbol{\theta}} & \frac{\partial \mathbf{P}_{flow}}{\partial \mathbf{V}} \\ \frac{\partial \mathbf{Q}_{flow}}{\partial \boldsymbol{\theta}} & \frac{\partial \mathbf{Q}_{flow}}{\partial \mathbf{V}} \\ \frac{\partial \mathbf{P}_{inj}}{\partial \boldsymbol{\theta}} & \frac{\partial \mathbf{P}_{inj}}{\partial \mathbf{V}} \\ \frac{\partial \mathbf{Q}_{inj}}{\partial \boldsymbol{\theta}} & \frac{\partial \mathbf{Q}_{inj}}{\partial \mathbf{V}} \\ 0 & \frac{\partial \mathbf{V}_{mag}}{\partial \mathbf{V}} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Expandindo-se a expressão (3.24) em séries de Taylor na vizinhança de  $\mathbf{x}$ , desconsiderando os termos de ordem superior a um, obtém-se um esquema iterativo conhecido como método de Gauss-Newton, dado por (ABUR; EXPÓSITO, 2004):

$$\mathbf{x}^{v+1} = \mathbf{x}^v - \left[ \mathbf{G}(\mathbf{x}^v) \right]^{-1} \mathbf{g}(\mathbf{x}^v) \quad (3.26)$$

onde:

$v$  refere-se ao índice de iterações e  $\mathbf{x}^v$  é o vetor solução na iteração  $v$ .

A matriz  $\mathbf{G}(\mathbf{x})$  é chamada de matriz ganho, calculada como:

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}^v) = \mathbf{H}^T(\mathbf{x}^v) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}(\mathbf{x}^v) \quad (3.27)$$

Uma estimativa para o vetor de variáveis de estado,  $\hat{\mathbf{x}}$ , é obtida ao resolver iterativamente o seguinte sistema de equações, referido como equações normais (ABUR; EXPÓSITO, 2004; MONTICELLI, 1999):

$$\left[ \mathbf{G}(\mathbf{x}^v) \right] \Delta \mathbf{x}^{v+1} = \mathbf{T} \quad (3.28)$$

onde:

$$\Delta \mathbf{x}^{v+1} = \mathbf{x}^{v+1} - \mathbf{x}^v;$$

$\mathbf{T}$  é o vetor do lado direito, calculado como  $\mathbf{T} = \mathbf{H}^T(\mathbf{x}^v) \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}^v)]$ .

Para que as equações normais sejam resolvidas iterativamente, deve-se especificar um valor inicial para o vetor de estados  $\mathbf{x}^0$ . Tipicamente utiliza-se a partida “flat” em que os módulos das tensões nas barras são iguais a 1 p.u. e os ângulos de fase são iguais a 0 rad (ABUR; EXPÓSITO, 2004). O fluxograma do estimador de estado baseado na formulação MQP é mostrado no APÊNDICE – A.

#### 3.1.4 Formulação EE-DR

O controle eletrônico de sistemas de potência em tempo real é uma realidade em diversas instalações ao redor do mundo, especialmente em um contexto de *Smart Grid*. A partir do desenvolvimento e aplicação *on-line* dos estimadores de estado baseados no método MQP, surgiu o interesse em desenvolver um método capaz de aliar a confiabilidade e precisão dos estimadores MQP com um baixo custo computacional e eficiência de execução (ROY; MOHAMMED, 1997).

Ao trabalhar com sistemas elétricos de grandes dimensões, o algoritmo MQP tradicional apresenta elevado custo computacional e está associado a um grande consumo de memória, haja vista que a matriz ganho é atualizada e decomposta a cada iteração (ABUR; EXPÓSITO, 2004). Verificou-se que os elementos da matriz ganho não sofrem grandes alterações desde a inicialização das variáveis até a obtenção de uma solução convergida, assim, a utilização de uma matriz ganho aproximada e constante pode reduzir o custo computacional associado ao algoritmo MQP convencional (ABUR; EXPÓSITO, 2004; TATSUNO; EJIMA; IWAMOTO, 2008).

Além disso, os acoplamentos  $P-\theta$  e  $Q-V$  observados em sistemas de transmissão permitem que o problema de estimação de estados seja formulado de

maneira a computar as contribuições relativas às potências ativa e reativa de forma independente. Esse princípio levou à formulação do problema de estimação de estados desacoplado-rápido (*EE-DR*) (ABUR; EXPÓSITO, 2004).

Na formulação *EE-DR* os elementos do vetor de grandezas medidas são rearranjados da seguinte forma:

$$\mathbf{z} = [\mathbf{z}_A \quad \mathbf{z}_R]^T \quad (3.29)$$

onde o índice *A* é usado como referência às grandezas medidas de potência ativa (injeções de potência ativa nas barras e fluxo de potência ativa nos ramos) e o índice *R* às grandezas medidas de potência reativa (injeções de potência reativa nas barras e fluxos de potência reativa nos ramos) (ABUR; EXPÓSITO, 2004; TATSUNO; EJIMA; IWAMOTO, 2008).

Da mesma forma, a matriz jacobiana de medidas **H** e a matriz de covariância dos erros das medidas **R** passam a ser escritas como (ABUR; EXPÓSITO, 2004):

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{AA} & \mathbf{H}_{AR} \\ \mathbf{H}_{RA} & \mathbf{H}_{RR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{P}_{inj,flow}}{\partial \boldsymbol{\theta}} & \frac{\partial \mathbf{P}_{inj,flow}}{\partial \mathbf{V}} \\ \frac{\partial \mathbf{Q}_{inj,flow}}{\partial \boldsymbol{\theta}} & \frac{\partial \mathbf{Q}_{inj,flow}}{\partial \mathbf{V}} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_A & 0 \\ 0 & \mathbf{R}_R \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Para que se obtenha uma matriz ganho aproximada e constante, consideram-se as condições de partida *flat*, ou seja, as magnitudes de tensão nas barras são iguais a 1 *p.u.* e seus ângulos de fase são iguais a 0 *rad*. Além disso, os blocos fora da diagonal principal de matriz Jacobiana de medidas ( $\mathbf{H}_{AR}$  e  $\mathbf{H}_{RA}$ ) passam a ser desconsiderados (ABUR; EXPÓSITO, 2004). Tais aproximações levam à obtenção de uma matriz ganho constante e desacoplada, calculada em função das condições de partida *flat*:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{AA} & 0 \\ 0 & \mathbf{G}_{RR} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

onde:



$$\mathbf{G}_{AA} = \mathbf{H}_{AA}^T \mathbf{R}_A^{-1} \mathbf{H}_{AA} \quad (3.33)$$

$$\mathbf{G}_{RR} = \mathbf{H}_{RR}^T \mathbf{R}_R^{-1} \mathbf{H}_{RR} \quad (3.34)$$

As mesmas aproximações feitas para a matriz Jacobiana de medidas são consideradas para o vetor do lado direito, que passa a ser calculado como (ABUR; EXPÓSITO, 2004):

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{AA}^T \mathbf{R}_A^{-1} \Delta \mathbf{z}'_A \\ \mathbf{H}_{RR}^T \mathbf{R}_R^{-1} \Delta \mathbf{z}'_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_A \\ \mathbf{T}_R \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

onde:

$$\Delta \mathbf{z}'_A = \Delta \mathbf{z}_A / \mathbf{V} \quad (3.36)$$

$$\Delta \mathbf{z}'_R = \Delta \mathbf{z}_R / \mathbf{V} \quad (3.37)$$

$$\Delta \mathbf{z}_A = \mathbf{z}_A - \mathbf{h}_A(\hat{\mathbf{x}}) \quad (3.38)$$

$$\Delta \mathbf{z}_R = \mathbf{z}_R - \mathbf{h}_R(\hat{\mathbf{x}}) \quad (3.39)$$

Existem duas variações básicas para o problema de *EE* baseados na formulação *EE-DR*, em função das aproximações consideradas no cálculo das matrizes  $\mathbf{H}_{AA}$  e  $\mathbf{H}_{RR}$ . Ao desconsiderar-se as resistências série dos ramos na formação da matriz  $\mathbf{H}_{AA}$  têm-se a versão *XB* do estimador de estado e ao desconsiderar as resistências série dos ramos na formação da matriz  $\mathbf{H}_{RR}$  têm-se a versão *BX* (ABUR; EXPÓSITO, 2004). O fluxograma do estimador de estado baseado na formulação *MQP-DR* é apresentado no ANEXO – A.

No método de *EE* baseado na formulação *DR* as soluções para os desvios dos ângulos e magnitudes das tensões nas barras são obtidas separadamente à cada meia iteração. A convergência do problema é testada em função de uma tolerância pré-estabelecida para esses dois vetores (MONTICELLI; GARCIA, 1990a). Quando comparado ao algoritmo *MQP* convencional, a redução no esforço computacional inerente ao algoritmo *EE-DR* está principalmente relacionado às aproximações feitas na matriz ganho, uma vez que as sub-matrizes  $\mathbf{G}_{AA}$  e  $\mathbf{G}_{RR}$  possuem dimensões reduzidas quando comparadas à matriz ganho completa, sendo formadas e decompostas em fatores triangulares apenas uma vez no início do processo iterativo (MONTICELLI; GARCIA, 1990a; TATSUNO; EJIMA; IWAMOTO, 2008).

### 3.1.5 Método MQP Linearizado

Em função do acoplamento  $P-\theta$  observado nas redes de transmissão, o problema de estimação de estados MQP convencional pode ser linearizado a partir da adoção das mesmas simplificações e linearizações empregadas no fluxo de carga linearizado clássico, conforme descrito em (MONTICELLI, 1983). O problema linearizado é especialmente relevante ao avaliar as limitações do método relacionadas à configuração do modelo de medição adotado (MONTICELLI, 1999).

O vetor de variáveis de estado passa a ser composto apenas pelos ângulos das tensões nas barras:

$$\boldsymbol{\theta} = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \cdots \quad \theta_n] \quad (3.40)$$

Como consequência, as equações de injeções e fluxos de potência ativa que representam as grandezas medidas passam a ser expressa de forma linearizada por:

$$P_{inj,i} = \sum_{j \in \Omega_i} b_{ij} (\theta_i - \theta_j) = \sum_{j \in \Omega_i} \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}} \quad (3.41)$$

$$P_{flow,ij} = b_{ij} (\theta_i - \theta_j) = \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}} \quad (3.42)$$

A partir das expressões (3.41) e (3.42), o modelo de medição é linearizado e passa a ser escrito em função do vetor de variáveis de estado  $\boldsymbol{\theta}$  (ABUR; EXPÓSITO, 2004):

$$\mathbf{z}_A = \mathbf{h}(\boldsymbol{\theta}) + \mathbf{e}_A = \mathbf{H}_{AA} \boldsymbol{\theta} + \mathbf{e}_A \quad (3.43)$$

onde:

o subscrito  $A$  faz referência às grandezas relacionadas a potência ativa do problema;

$\mathbf{h}(\boldsymbol{\theta})$  diz respeito ao vetor de funções lineares que relaciona  $\mathbf{z}_A$  a  $\boldsymbol{\theta}$ ;

$\mathbf{H}_{AA}$  é a matriz Jacobiana das medidas de potência ativa.

O vetor linearizado dos resíduos das medidas, que permite verificar a diferença entre os valores medidos e estimados é definido por:

$$\mathbf{r} = \mathbf{z}_A - \mathbf{H}_{AA} \boldsymbol{\theta} \quad (3.44)$$

De forma que o problema linearizado de *EE* é definido para minimizar a seguinte função objetivo:

$$J(\boldsymbol{\theta}) = \min \left[ (\mathbf{z}_A - \mathbf{H}_{AA} \boldsymbol{\theta})^T \mathbf{R}_{AA}^{-1} (\mathbf{z}_A - \mathbf{H}_{AA} \boldsymbol{\theta}) \right] \quad (3.45)$$

onde  $\mathbf{R}_{AA}$  é a matriz de covariância dos erros das medidas de potência ativa.

A condição de otimalidade de primeira ordem para a expressão (3.45) leva ao seguinte sistema de equações lineares:

$$\mathbf{G}_{AA} \boldsymbol{\theta} = \mathbf{b} \quad (3.46)$$

onde  $\mathbf{G}_{AA}$  é a matriz ganho calculada pela expressão (3.33) e  $\mathbf{b}$  é designado como vetor do lado direito, calculado por:

$$\mathbf{b} = \mathbf{H}_{AA}^T \mathbf{R}_{AA}^{-1} \mathbf{z}_{AA} \quad (3.47)$$

Uma estimativa para o vetor de variáveis de estado da formulação linearizada do problema de *EE* é obtida ao resolver o sistema linear expresso em (3.46) para  $\boldsymbol{\theta}$ .

### 3.2 CONTROLADORES FACTS

Nos sistemas de energia elétrica convencionais, o controle dos fluxos de potência é feito ao regular-se a potência gerada nas centrais geradoras, enquanto que a regulação de tensão é feita pela comutação de *taps* em transformadores e pela compensação de reativos provida por bancos de capacitores e/ou reatores. Até recentemente tais soluções suprimiram as necessidades das concessionárias e usuários (ACHA et al., 2004). Mudanças na potência demandada pelas cargas e em seus respectivos fatores de potência refletem em alterações nos perfis de tensão ao longo das linhas de transmissão, acarretando em variações nas tensões terminais das barras do sistema. Alterações bruscas de potência reativa causadas por faltas, comutação de linhas e outras perturbações também acarretam em impactos severos para o sistema, ocasionando variações de tensão, elevação nas perdas de transmissão e alterações repentinas na demanda de potência ativa (GYUGYI, 1988).

Tais situações impactam significativamente a operação dos geradores, alterando suas velocidades de rotação, podendo causar problemas relacionados a frequências transitórias e oscilações de potência e até ocasionar perdas de sincronismo com consequências catastróficas para o sistema. Por essa razão o controle de reativos deve ser feito com rapidez, provendo regulação de tensão e dos fluxos de potência, melhorando significativamente a estabilidade e a confiabilidade do sistema.

Originalmente um sistema de potência era projetado para ser autossuficiente, uma vez que a importação e a exportação de energia eram raras. Além disso, em função da utilização de dispositivos de controle eletromecânicos, era consenso entre pesquisadores que os sistemas de transmissão e distribuição não poderiam ser controlados com rapidez suficiente para tratar problemas dinâmicos (HINGORANI, 1988). Assim, utilizava-se a abordagem de superdimensionamento: os sistemas de transmissão eram concebidos com grandes margens de estabilidade para que pudessem se recuperar de contingências causadas por faltas, quedas de linhas de transmissão e falhas em equipamentos e geradores (GYUGYI, 1992).

Nas últimas três décadas, pressões regulatórias impostas ao setor elétrico, questões ambientais e limitações financeiras acabaram por atrasar a construção de novas centrais geradoras e linhas de transmissão, ao passo que a demanda energética continuou a crescer. Isso fez com que algumas práticas e conceitos tradicionalmente empregados no planejamento e operação de sistemas de potência fossem revisados, tornando imperativa a busca por maneiras de otimizar e flexibilizar a utilização das instalações existentes (GYUGYI, 1988).

Dentre as opções disponíveis para otimizar a utilização das instalações elétricas de alta tensão existentes, mantendo (e até elevando) os níveis de confiabilidade e estabilidade do sistema, as soluções baseadas na utilização de dispositivos de eletrônica de potência mostrou-se promissora. Tais dispositivos surgiram como complementos às soluções tradicionais, normalmente baseadas em dispositivos eletromecânicos com baixo tempo de resposta e elevados custos de manutenção (ACHA et al., 2004; HINGORANI, 1988).

Assim desenvolveu-se o conceito de *Flexible Alternating Current Transmission Systems*, ou simplesmente *FACTS*, uma solução que proporciona novas oportunidades para o controle de sistemas de potência, elevando a capacidade de utilização de instalações existentes e novas (ACHA et al., 2004; HINGORANI;

GYUGYI; EL-HAWARY, 1999; TORTELLI, 2010). Tais oportunidades estão relacionadas à capacidade dos controladores *FACTS* de controlar os parâmetros que regem a operação dos sistemas de transmissão, como impedâncias série e *shunt*, magnitudes de corrente, módulos e ângulos de fase de tensões, também proporcionando melhor amortecimento às oscilações transitórias, possibilitando uma maior flexibilidade para os sistemas de potência, melhorando suas características de controlabilidade e transferência de potência (EDRIS et al., 1997; HINGORANI, 1988; HINGORANI; GYUGYI; EL-HAWARY, 1999; TORTELLI, 2010). No que se refere a sistemas de energia, o termo “flexibilidade” está relacionado à habilidade de adaptação dos sistemas de transmissão frente a mudanças em condições operativas, de forma a manter margens de estabilidade suficientes em transitórios e regime permanente (EDRIS et al., 1997).

Vale destacar que a tecnologia dos controladores *FACTS* não engloba apenas um dispositivo de potência com inúmeras funcionalidades, mas sim um conjunto de controladores que podem ser utilizados individual ou coordenadamente para realizar o controle dos parâmetros já mencionados. Nesse sentido, os controladores *FACTS* não devem ser utilizados como substitutos dos dispositivos eletromecânicos tradicionalmente empregados em sistemas de potência, mas sim como complementos capazes de flexibilizar o sistema e proporcionar respostas rápidas às contingências que ocorrem no sistema (HINGORANI; GYUGYI; EL-HAWARY, 1999). O desenvolvimento dos controladores *FACTS* pode ser dividido em duas gerações, distintas por características construtivas e pela tecnologia empregada nas chaves de potência presentes nos dispositivos.

A primeira geração tem como característica a utilização de tiristores convencionais, ou *SCRs* (*Silicon Controlled Rectifiers*), inseridos em arranjos similares aos capacitores e reatores chaveados. O controle do ângulo de disparo dos tiristores permite a regulação da impedância equivalente dos controladores, que em regime permanente atuam como reatâncias variáveis. Essa característica permite aos controladores *FACTS* da primeira geração atuar no controle de magnitudes de tensão e dos fluxos de potência transmitidos no ramo em que são inseridos.

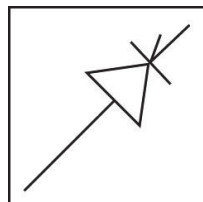
A segunda geração se caracteriza pela utilização de dispositivos com capacidade de desligamento pelo *gate*, como o *GTO* (*Gate Turn-off Thyristor*) e o *IGBT* (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). De maneira geral, os controladores baseados em dispositivos com capacidade de desligamento pelo *gate* são

constituídos por conversores CC/CA, capazes de trocar tanto potência ativa quanto potência reativa com o sistema (HINGORANI; GYUGYI; EL-HAWARY, 1999).

Quando a operação de um determinado controlador pertencente à segunda geração envolve apenas a troca de potência reativa com o sistema, o armazenamento de energia no lado CC é minimamente dimensionado para atender a tal necessidade. Quando a operação do controlador envolve também a troca de potência ativa com o sistema, o armazenamento de energia pode ser aumentado, adicionando-se bancos de baterias ou outras fontes de armazenamento em paralelo com sua interface eletrônica. A adição de fontes extras de armazenamento de energia proporciona uma maior capacidade de controle dinâmico aos controladores *FACTS* da segunda geração, haja vista que absorver ou injetar potência ativa no sistema CA proporciona maior flexibilidade que apenas controlar as transferências de potência internas ao sistema (HINGORANI; GYUGYI; EL-HAWARY, 1999).

O símbolo geral adotado para representar controladores *FACTS* em diagramas elétricos é mostrado na FIGURA 3.3.

FIGURA 3.3 - SÍMBOLO GERAL PARA CONTROLADORES FACTS



FONTE: Adaptado de (HINGORANI; GYUGYI; EL-HAWARY, 1999).

Em geral, os controladores *FACTS* podem ser divididos em quatro categorias: (i) controladores série; (ii) controladores *shunt* (em derivação); (iii) controladores combinados série-série, e; (iv) controladores combinados série-*shunt* (HINGORANI; GYUGYI; EL-HAWARY, 1999).

Tradicionalmente, os fluxos de potência em um sistema elétrico se distribuem em função das impedâncias dos equipamentos e linhas de transmissão presentes no sistema. Do ponto de vista da operação, na ocasião de contingências cabe aos operadores do sistema intervirem de forma a redistribuir os fluxos de potência no sistema, evitando ilhamentos, danos a equipamentos e acidentes em geral. Assim, o controle dos fluxos de potência se torna especialmente relevante do ponto de vista operacional, especialmente em sistemas complexos e de grandes dimensões. Com o desenvolvimento dos controladores *FACTS*, verificou-se que os elementos de

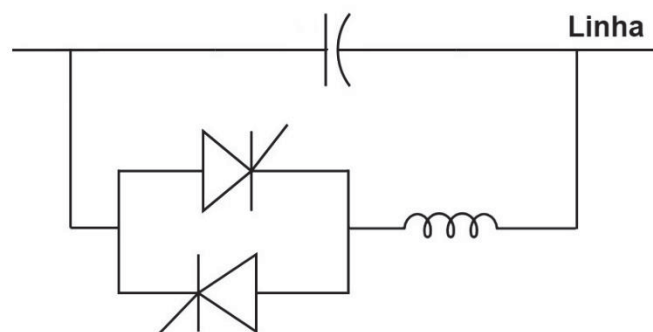
compensação série são altamente eficientes tanto no controle dos fluxos de potência quanto na melhora das margens de estabilidade do sistema (HINGORANI; GYUGYI; EL-HAWARY, 1999).

Nesse sentido, os controladores *FACTS* série podem ser aplicados para maximizar a utilização dos sistemas de potência, atuando no controle dos fluxos de potência nas linhas, reduzindo variações de tensão a fim de prevenir colapsos de tensão, além de elevar os limites de estabilidade transitória e fornecer amortecimento extra à oscilações transitórias e subsíncronas (HINGORANI; GYUGYI; EL-HAWARY, 1999). Tais funções estão principalmente relacionadas à atuação do *Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)*, o controlador *FACTS* de interesse para o presente trabalho de pesquisa, cujas características construtivas e operacionais são apresentadas com maior detalhamento na próxima Seção.

### 3.2.1 *Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)*

O *Thyristor Controlled Series Capacitor*, também referido pelo acrônimo *TCSC*, é um controlador *FACTS* que pertence à primeira geração, e consiste de um compensador série capacitivo proposto como um método rápido para ajustar-se a impedância de ramo, possuindo também aplicações no amortecimento de oscilações subsíncronas (HINGORANI; GYUGYI; EL-HAWARY, 1999). O módulo básico simplificado do *TCSC* consiste de um *TCR* (do inglês, *Thyristor Controlled Reactor*), em paralelo com um capacitor fixo (EDRIS et al., 1997), conforme ilustrado na FIGURA 3.4.

FIGURA 3.4 – MÓDULO BÁSICO DO *TCSC*

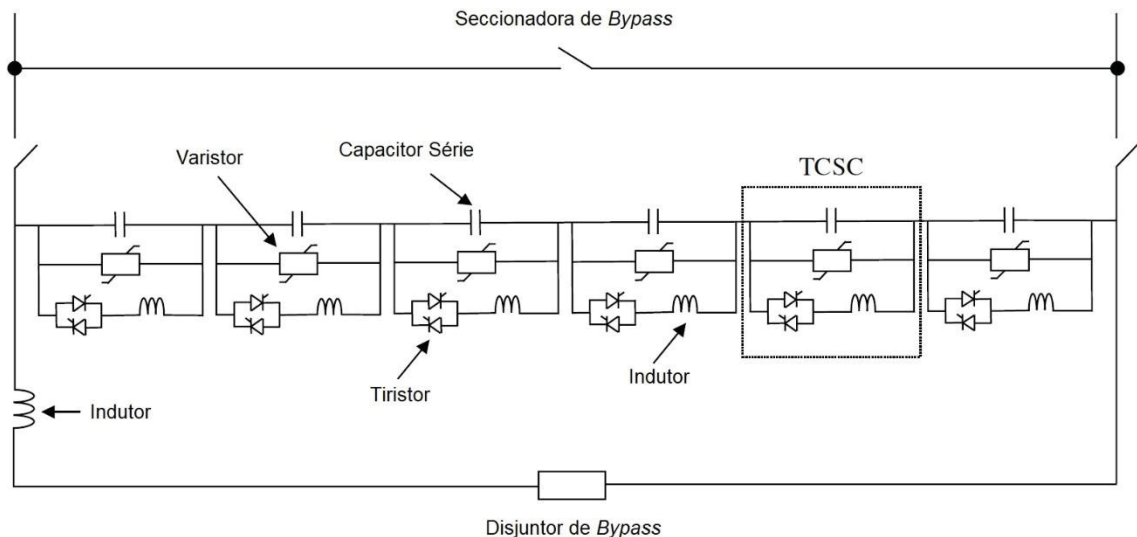


FONTE: Adaptada de (ACHA et al., 2004; ZAMORA-CARDENAS; FUERTE-ESQUIVEL, 2012).



A estrutura monofásica de um TCSC real é composta por um ou mais blocos similares ao mostrado na FIGURA 3.4, conectados em série para que se obtenham a classe de tensão e as características operacionais desejadas (HINGORANI; GYUGYI; EL-HAWARY, 1999), conforme ilustrado na FIGURA 3.5.

FIGURA 3.5 - ESTRUTURA MONOFÁSICA DE UM TCSC REAL



FONTE: Adaptada de (ACHA et al., 2004).

O princípio de funcionamento do TCSC está relacionado a fornecer compensação série reativa de maneira suave e constante, variando o comprimento elétrico da linha compensada com eficiência e confiabilidade (HINGORANI; GYUGYI; EL-HAWARY, 1999). Essa característica permite ao TCSC fornecer regulação rápida no fluxo de potência ativa no ramo em que é instalado (ACHA et al., 2004).

A resposta do TCSC em regime permanente pode ser obtida a partir da solução das equações diferenciais que descrevem seu comportamento elétrico, utilizando-se de um método de integração numérica apropriado, o que pode envolver sobrecargas computacionais. Como alternativa, as equações diferenciais podem ser expressas na forma algébrica e solucionadas fasorialmente para a frequência fundamental, que consiste na solução tradicionalmente adotada em estudos de fluxo de potência (ACHA et al., 2004).

Assim, para efeitos de estudos de fluxo de potência, a estrutura monofásica completa do TCSC apresentada na FIGURA 3.5 pode ser substituída pela representação monofásica equivalente simplificada apresentada na FIGURA 3.4 (ACHA et al., 2004). A representação monofásica equivalente simplificada pode ser

associada a uma reatância equivalente, escrita em função dos parâmetros indutivos e capacitivos do modelo equivalente simplificado do TCSC e do ângulo de disparo dos tiristores, da seguinte forma (ACHA et al., 2004):

$$x_{TCSC} = -X_c + C_1 \left\{ 2(\pi - \alpha) + \sin[2(\pi - \alpha)] \right\} + C_2 [\cos(\pi - \alpha)]^2 \left\{ \varpi \tan[\varpi(\pi - \alpha)] - \tan(\pi - \alpha) \right\} \quad (3.48)$$

onde:

$$C_1 = \frac{X_c + X_{LC}}{\pi} \quad (3.49)$$

$$C_2 = -\frac{4X_{LC}^2}{X_L \pi} \quad (3.50)$$

$$X_{LC} = \frac{X_c X_L}{X_c - X_L} \quad (3.51)$$

$$\varpi = \frac{\omega_0}{\omega} \quad (3.52)$$

$X_c = -\frac{1}{\omega C}$  é a impedância do ramo capacitivo do modelo equivalente simplificado do TCSC, em  $\Omega$ ;

$X_L = \omega L$  é a impedância do ramo do TCR do modelo equivalente simplificado do TCSC, em  $\Omega$ ;

$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  é a frequência de ressonância do circuito LC do modelo equivalente simplificado do TCSC, em rad/s;

$\omega = 2\pi f$  é a frequência angular em rad/s;

$f$  é a frequência elétrica em Hz;

$\alpha$  é o ângulo de disparo dos tiristores do modelo equivalente simplificado do TCSC, em rad.

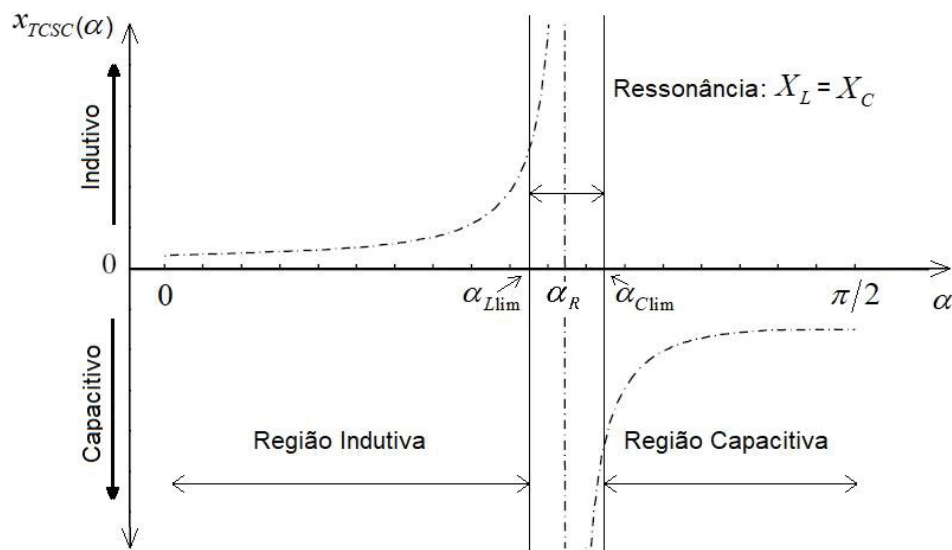
Os pólos da expressão (3.48) são:

$$\alpha = \pi - \frac{(2n-1)(LC)^{1/2} \pi \omega}{2}, \text{ para } n=1,2,3,\dots \quad (3.53)$$

Construtivamente, a reatância capacitiva e a reatância indutiva do TCSC devem ser cuidadosamente escolhidas, de forma que apenas um ponto de ressonância esteja presente na faixa de operação do controlador em função do ângulo de disparo dos tiristores, compreendida entre 0 e  $\pi/2$ . No modelo monofásico

simplificado do TCSC, a impedância do ramo do TCR ( $X_L$ ) é menor que a do ramo do capacitor ( $X_C$ ). Assim, conforme ilustrado na FIGURA 3.6, o TCSC possui duas faixas de operação na vizinhança de sua frequência de ressonância: (i) operação capacitiva, com  $\alpha_{Clim} \leq \alpha \leq \pi/2$ , e; operação indutiva, com  $0 \leq \alpha \leq \alpha_{Lim}$  (HINGORANI; GYUGYI; EL-HAWARY, 1999).

FIGURA 3.6 - IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE DO TCSC VERSUS ÂNGULO DE DISPARO



FONTE: Adaptada de (HINGORANI; GYUGYI; EL-HAWARY, 1999).

A partir da FIGURA 3.6 pode-se verificar uma descontinuidade na curva referente à reatância equivalente do TCSC em função ao ângulo de disparo dos tiristores, na transição da região de operação indutiva para a região de operação capacitiva. Isso reforça a importância da escolha adequada dos parâmetros construtivos do TCSC, para que sejam atendidos os requerimentos operativos em cada caso específico respeitando-se a relação entre a reatância equivalente do controlador e o ângulo de disparo, conforme ilustrado na FIGURA 3.6.

Em condições normais, a operação do TCSC na região indutiva é pouco explorada, haja vista que o aumento do comprimento elétrico do ramo causado pela compensação fornecida pelo dispositivo nessa condição pode causar consequências adversas para o sistema, como aumento de perdas e redução das margens de estabilidade (ACHA et al., 2004). Assim, considerando efeitos práticos e condições normais de operação, um TCSC não alternará seu modo operativo, sendo projetado para operar exclusivamente em uma das possíveis regiões operativas.

Em estudos de fluxo de potência em regime permanente, a representação do *TCSC* como uma reatância equivalente permite a inserção de seu parâmetro de controle na matriz de admitância nodal. Essa característica será apresentada com maior detalhamento nas Seções subsequentes, e é explorada no desenvolvimento da proposta central do presente trabalho de pesquisa. Essa simplificação permite uma análise direta do efeito de compensação causado pelo dispositivo, desconsiderando as complexidades que envolvem a relação estabelecida entre a reatância equivalente do *TCSC* e o ângulo de disparo de seus tiristores, conforme disposto em (3.48).

## 4 ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO COM CONTROLADORES *FACTS*

No presente capítulo são apresentadas as metodologias desenvolvidas para a inserção do controlador *FACTS TCSC* em duas versões do problema de *EE* baseadas no método *MQP*. Inicialmente é apresentado um estimador de estados *MQP* linearizado para sistemas que contém o dispositivo *TCSC*. Em seguida é apresentada a proposta central desenvolvida no presente trabalho, que diz respeito à versão não linear baseada na formulação *DR* do estimador de estado capaz de processar sistemas de transmissão com *TCSCs*.

### 4.1 ESTIMADOR DE ESTADO *MQP* LINEARIZADO COM *FACTS*

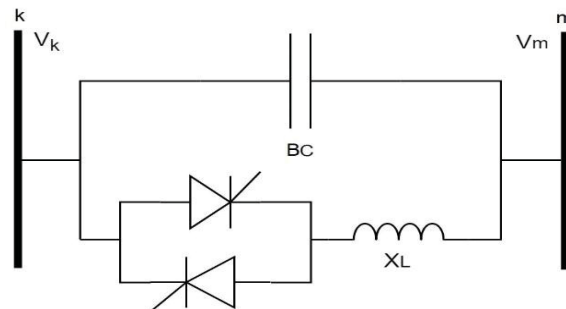
Em sistemas de potência tradicionais, os fluxos de potência ativa e reativa distribuem-se na rede elétrica principalmente em função das impedâncias dos ramos. Na ocasião de contingências, cabe ao operador do sistema intervir a fim de redistribuir os fluxos de potência de forma a evitar problemas como: perda de estabilidade, elevação nas perdas na transmissão, violações de limites de tensão, limitação da capacidade de transmissão por aquecimento dos condutores, entre outros (ACHA et al., 2004).

Nesse contexto, o *TCSC* é um controlador *FACTS* que, em regime permanente, atua como uma reatância controlável capaz de prover controle sobre o fluxo de potência ativa em um ramo. Isso é alcançado por meio da variação contínua e controlada do efeito de compensação série indutiva ou capacitiva, que possibilita elevar ou reduzir o comprimento elétrico da linha de transmissão em que o controlador é inserido. O *TCSC* também possui aplicações no amortecimento de oscilações transitórias e na atenuação de ressonâncias subsíncronas, resultando em ganhos significativos na capacidade de transmissão das linhas com maiores margens de estabilidade transitória (ACHA et al., 2004; KOLOSOK; TIKHONOV, 2017).

#### 4.1.1 Modelagem linearizada do fluxo de potência através do TCSC

O módulo monofásico básico do TCSC, mostrado na FIGURA 4.1, é composto por um TCR conectado paralelamente a uma capacitância fixa. Um TCSC real pode conter dois ou mais desses módulos básicos conectados em série (ACHA et al., 2004).

FIGURA 4.1 - MODELO MONOFÁSICO SIMPLIFICADO DO TCSC



FONTE: Adaptada de (ACHA et al., 2004; ZAMORA-CARDENAS; FUERTE-ESQUIVEL, 2012).

onde:

$k$  e  $m$  são as barras terminais do TCSC;

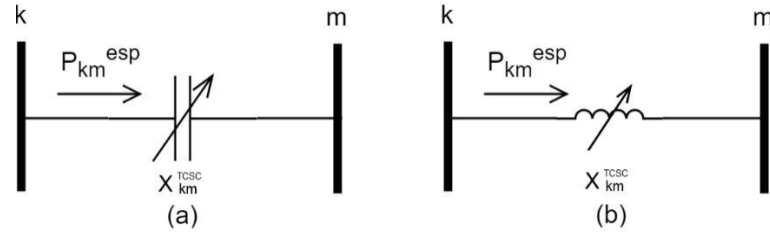
$V_k$  e  $V_m$  são as tensões complexas nas barras  $k$  e  $m$ ;

$B_C$  é a susceptância do capacitor fixo do TCSC;

$X_L$  é a reatância do indutor fixo do TCSC.

Em termos práticos, o modelo monofásico do TCSC pode ser representado como uma reatância equivalente variável conectada em série à uma linha de transmissão, cujo valor é ajustado automaticamente para que se mantenha um fluxo de potência especificado  $P_{km}^{esp}$  no ramo compensado pelo dispositivo (ACHA et al., 2004; LI; VANFRETTI, 2015). A reatância equivalente do TCSC, referida por  $x_{km}^{TCSC}$ , pode assumir característica capacitiva ou indutiva, sendo ajustada a fim de fornecer regulação rápida e confiável no fluxo de potência ativa do ramo compensado, conforme ilustrado na FIGURA 4.2.

FIGURA 4.2 - REATÂNCIA EQUIVALENTE VARIÁVEL DO TCSC EM DIFERENTES CONDIÇÕES OPERATIVAS



FONTE: Adaptada de (ACHA et al., 2004).

LEGENDA:

(a) TCSC operando na região capacitiva.

(b) TCSC operando na região indutiva.

Considerando as aproximações do fluxo de carga linearizado, os fluxos de potência ativa no ramo controlado  $k - m$  passam a ser calculados apenas em função dos ângulos das tensões nas barras  $k$  e  $m$ , e da reatância equivalente do TCSC,  $x_{km}^{TCSC}$ .

$$P_{km} = P_{km}^{TCSC} = \frac{\theta_k - \theta_m}{x_{km}^{TCSC}} \quad (4.1)$$

$$P_{mk} = P_{mk}^{TCSC} = \frac{\theta_m - \theta_k}{x_{km}^{TCSC}} \quad (4.2)$$

A injeção de potência ativa em uma barra genérica é igual à soma dos fluxos de potência que saem da barra. Nesse sentido, a injeção de potência ativa nas barras terminais do ramo controlado  $k - m$  podem ser expressas como a soma de duas parcelas:

$$P_k = P_k^{Rede} + P_{km}^{TCSC} \quad (4.3)$$

$$P_m = P_m^{Rede} + P_{mk}^{TCSC} \quad (4.4)$$

As parcelas  $P_k^{Rede}$  e  $P_m^{Rede}$  dizem respeito ao somatório dos fluxos de potência ativa que fluem em todos os ramos convencionais adjacentes às barras  $k$  e  $m$ , respectivamente, enquanto que as parcelas  $P_{km}^{TCSC}$  e  $P_{mk}^{TCSC}$  dizem respeito aos fluxos de potência ativa que fluem através do TCSC e, portanto, são diretamente influenciados pelo controle provido pelo TCSC, ou seja, os fluxos de potência ativa  $P_{km}^{TCSC}$  e  $P_{mk}^{TCSC}$  são as contribuições do TCSC para as injeções de potência ativa nas barras  $k$  e  $m$ , que passam a ser calculadas como:

$$P_k = \sum_{n \in \Omega_k^c} x_{kn}^{-1} \theta_{kn} + P_{km}^{TCSC} \quad (4.5)$$

$$P_m = \sum_{n \in \Omega_m^c} x_{mn}^{-1} \theta_{mn} + P_{mk}^{TCSC} \quad (4.6)$$

onde:

$n$  corresponde ao conjunto de barras comuns vizinhas às barras  $k$  e  $m$ ;

$x_{kn}$  e  $x_{mn}$  são as reatâncias dos ramos comuns conectados às barras  $k$  e  $m$ .

#### 4.1.2 Gerador de grandezas medidas linearizado para sistemas de transmissão com TCSCs

Conforme apresentado na Seção 3.1.2, o conjunto de medidas que alimenta os estimadores de estados desenvolvidos no presente trabalho são obtidos ao aplicar a solução do problema de fluxo de carga às funções de medição, com suporte do plano de medição definido para um determinado sistema-teste em cada caso de simulação. Nesse sentido, o primeiro passo no desenvolvimento do estimador de estado linearizado para sistemas de transmissão com TCSC requer o desenvolvimento de um gerador linearizado de grandezas medidas, capaz de processar sistemas dessa natureza. Assim, o problema de fluxo de carga linearizado, modificado para processar para sistemas de transmissão com TCSCs é apresentado a seguir.

Inicialmente, o vetor de variáveis de estado do problema de fluxo de carga linearizado é expandido com a inserção da(s) reatância(s) equivalente(s) do(s) TCSC(s), e passa a ser escrito como:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta} & \mathbf{x}^{TCSC} \end{bmatrix}^T \quad (4.7)$$

onde:

$\mathbf{x}$  é o vetor de variáveis de estado do problema linearizado;

$\boldsymbol{\theta}$  é o vetor dos ângulos das tensões nas barras do sistema, de dimensão  $nb$ ;

$\mathbf{x}^{TCSC}$  é o vetor das reatâncias equivalentes dos controladores presentes no sistema, de dimensão  $nTCSC$ .

Considerando o princípio de operação do TCSC, deseja-se que o controlador modifique sua reatância equivalente para que seja mantido um fluxo de potência ativa



desejado no ramo controlado. Considerando o ramo  $k-m$  da FIGURA 4.2, especifica-se o fluxo de potência ativa desejado que flui de  $k$  para  $m$  como  $P_{km}^{esp}$ , dado por:

$$P_{km}^{esp} = P_{km}^{TCSC} = \frac{\theta_k - \theta_m}{x_{km}^{TCSC}} \quad (4.8)$$

Por se tratar de um valor especificado,  $P_{km}^{esp}$  deixa de ser uma incógnita para o problema. A expressão (4.8) relaciona as variáveis de estado tradicionais do modelo linearizado ao fluxo de potência ativa especificado no ramo controlado pelo TCSC, e, a partir de uma simples manipulação matemática pode ser reescrita como:

$$0 = \frac{\theta_k}{P_{km}^{esp}} - \frac{\theta_m}{P_{km}^{esp}} - x_{km}^{TCSC} = M_0^{TCSC} \quad (4.9)$$

A expressão (4.9) é incluída no vetor de injeções de potência do problema de fluxo de carga linearizado. Trata-se de um valor nulo referido por  $M_0^{TCSC}$ , associado a cada um dos controladores presentes no sistema e que relaciona as variáveis de estado do modelo linearizado tradicional (ângulos das tensões nas barras) ao fluxo de potência ativa especificado no ramo controlado e à reatância equivalente do TCSC. O vetor de injeções de potência expandido passa a ser escrito como:

$$\mathbf{P}^{ext} = \left[ \mathbf{P} \quad \mathbf{M}_0^{TCSC} \right]^T \quad (4.10)$$

onde:

$\mathbf{P}$  é o vetor de injeções de potência ativa nas barras, de dimensão  $nb-1$ ;

$\mathbf{M}_0^{TCSC}$  é o vetor nulo associado aos fluxos de potência especificados nos ramos controlados, de dimensão  $nTCSC$ .

A fim de contabilizar a influência exercida pelos TCSCs, os elementos do vetor  $\mathbf{P}$  referentes às barras terminais dos controladores são alterados. Considerando o modelo linearizado sem perdas pode-se afirmar que o fluxo de potência ativa em um ramo genérico, em módulo, seja igual nos dois sentidos. Assim, os elementos de  $\mathbf{P}$  referentes às barras terminais do TCSC,  $k$  e  $m$ , são alterados da seguinte forma:

$$P_k = P_k^{Rede} - P_{km}^{esp} \quad (4.11)$$

$$P_m = P_m^{\text{Rede}} + P_{km}^{\text{esp}} \quad (4.12)$$

A inserção dos TCSCs resulta também em alterações na matriz  $\mathbf{B}'$ , que passa a ser referida como  $\mathbf{B}'_{\text{TCSC}}$ . São inseridas novas linhas, em função das expressões nulas  $\mathbf{M}_0^{\text{TCSC}}$ , e novas colunas, referentes às derivadas parciais das injeções de potência e expressões nulas em relação a  $\mathbf{x}^{\text{TCSC}}$ . Para o exemplo do ramo  $k-m$  mostrado na FIGURA 4.2, têm-se:

$$\mathbf{B}'_{\text{TCSC}} = \left[ \begin{array}{cc|c} \mathbf{B}' & & \frac{\partial P_k}{\partial x_{km}^{\text{TCSC}}} \\ & & \frac{\partial P_m}{\partial x_{km}^{\text{TCSC}}} \\ \hline \frac{\partial M_{0,km}^{\text{TCSC}}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial M_{0,km}^{\text{TCSC}}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial M_{0,km}^{\text{TCSC}}}{\partial x_{km}^{\text{TCSC}}} \end{array} \right] \quad (4.13)$$

onde:

$$\frac{\partial P_k}{\partial x_{km}^{\text{TCSC}}} = 0 \quad (4.14)$$

$$\frac{\partial P_m}{\partial x_{km}^{\text{TCSC}}} = 0 \quad (4.15)$$

$$\frac{\partial M_{0,km}^{\text{TCSC}}}{\partial x_{km}^{\text{TCSC}}} = -1 \quad (4.16)$$

$$\frac{\partial M_{0,km}^{\text{TCSC}}}{\partial \theta_k} = \frac{1}{P_{km}^{\text{esp}}} \quad (4.17)$$

$$\frac{\partial M_{0,km}^{\text{TCSC}}}{\partial \theta_m} = -\frac{1}{P_{km}^{\text{esp}}} \quad (4.18)$$

A submatriz  $\mathbf{B}'$  é a mesma matriz do fluxo de carga linearizado tradicional, computada apenas em função das reatâncias dos ramos comuns do sistema. Vale ressaltar que no caso em que existem TCSCs no sistema,  $\mathbf{B}'$  é computada sem considerar a presença dos controladores, de forma que os ramos controlados são substituídos por circuitos abertos. A partir de tais modificações, o sistema linear resultante a ser resolvido passa a ser dado por:

$$\mathbf{P}^{ext} = \mathbf{B}'_{TCSC} \mathbf{x} \quad (4.19)$$

A solução do sistema da expressão (4.19) permite encontrar os valores dos ângulos das tensões nas barras em conjunto com a reatância equivalente dos *TCSCs* em função dos fluxos de potência ativa especificados nos ramos controlados. Vale ressaltar que nessa etapa são obtidos apenas os valores para as variáveis de estado do problema, utilizadas tanto para o cálculo das medidas a serem fornecidas ao estimador quanto como valores calculados que servirão para verificar, ao final do processo de estimação, a precisão e aplicabilidade do estimador proposto.

A partir do resultado da solução do sistema dado em (4.19), as expressões (4.1) e (4.2) são utilizadas como funções de medição para os fluxos de potência nos ramos controlados, e as expressões (4.5) e (4.6) como funções de medição para as injeções de potência ativa nas barras terminais dos controladores. O vetor de medidas perfeitas e o vetor de medidas contaminadas por ruído normal são obtidos conforme a metodologia apresentada na Seção 3.1.2

#### 4.1.3 Estimador de Estado *MQP* linearizado para sistemas com *TCSCs*

Na presente Seção é apresentada a metodologia aplicada para adaptar o estimador de estado *MQP* linearizado tradicional a fim de torna-lo capaz de processar sistemas de transmissão que contém o controlador *FACTS TCSC*. Para tanto, propõe-se a inserção do parâmetro de controle do *TCSC* como uma nova variável de estado para o problema de *EE* linearizado. A principal modificação da proposta diz respeito à utilização da expressão nula referida por  $M_0^{TCSC}$  como uma pseudo-medida nula a ser fornecida ao estimador, dando origem ao estimador de estado baseado no método *MQP* linearizado para sistemas de transmissão com *TCSC*, também referido por *Thyristor Controlled Series Capacitor Linearized State Estimator*, ou *TCSC-LSE*.

De acordo com a proposta do *TCSC-LSE*, o vetor de variáveis de estado do problema de *EE* linearizado é estendido para comportar as reatâncias equivalentes dos *TCSCs* presentes no sistema:

$$\boldsymbol{\theta}^{ext} = \begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 & \cdots & \theta_n & x_1^{TCSC} & x_2^{TCSC} & \cdots & x_i^{TCSC} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

onde  $i$  é o número de *TCSCs* existentes no sistema.

A fim de incorporar no vetor de medidas a influência exercida pelo fluxo de potência especificado em um ramo controlado, as funções de medição das injeções de potência ativa nas barras terminais do controlador são modificadas da seguinte forma:

$$\mathbf{P}_{inj}^{TCSC} = \begin{bmatrix} P_k^{TCSC} \\ P_m^{TCSC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_k - P_{km}^{esp} \\ P_m + P_{km}^{esp} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

As pseudo-medidas nulas associadas a cada um dos controladores presentes no sistema, expressas por (4.9), são inseridas no vetor de medidas. Por se tratar de uma informação determinística, ao computar a matriz de covariância dos erros das medidas propõe-se atribuir às pseudo-medidas nulas pesos da mesma ordem de grandeza daqueles adotados às injeções de potência nulas em barras sem carga. O vetor de medidas representado de forma estendida é escrito como:

$$\mathbf{z}_A^{ext} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{flow}^C & \mathbf{P}_{inj}^C & \mathbf{P}_{inj}^{TCSC} & \mathbf{M}_0^{TCSC} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

onde:

$\mathbf{P}_{flow}^C$  e  $\mathbf{P}_{inj}^C$  são os vetores de medidas de fluxo de potência ativa nos ramos convencionais e injeções de potência ativa nas barras convencionais, respectivamente;

$\mathbf{P}_{inj}^{TCSC}$  é o vetor de medidas de injeção de potência nas barras terminais dos TCSCs;

$\mathbf{M}_0^{TCSC}$  é o vetor de pseudo-medidas nulas associadas aos fluxos de potência ativa especificados nos ramos controlados pelos TCSCs.

A matriz Jacobiana de medidas estendida,  $\mathbf{H}(\boldsymbol{\theta}^{ext})$ , é computada em função das derivadas parciais das funções de medição em relação às variáveis de estado do problema:

$$\mathbf{H}^{ext} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{P}_{flow}^C}{\partial \boldsymbol{\theta}} & 0 \\ \frac{\partial \mathbf{P}_{inj}^C}{\partial \boldsymbol{\theta}} & 0 \\ \frac{\partial \mathbf{P}_{inj}^{TCSC}}{\partial \boldsymbol{\theta}} & 0 \\ \frac{\partial \mathbf{M}_0^{TCSC}}{\partial \boldsymbol{\theta}} & \frac{\mathbf{M}_0^{TCSC}}{\partial \mathbf{x}^{TCSC}} \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

Considerando que o fluxo de potência ativa do ramo  $k-m$  seja controlado pelo TCSC, os elementos correspondentes da matriz  $\mathbf{H}^{ext}$  são calculados da seguinte forma:

$$\frac{\partial P_{inj,k}^{TCSC}}{\partial \theta_k} = \sum_{j \in \Omega_k^c} \frac{1}{x_{kj}} \quad \frac{\partial P_{inj,m}^{TCSC}}{\partial \theta_m} = \sum_{j \in \Omega_m^c} \frac{1}{x_{mj}} \quad (4.24)$$

$$\frac{\partial P_{inj,k}^{TCSC}}{\partial \theta_m} = -\frac{1}{x_{km}} \quad \frac{\partial P_{inj,m}^{TCSC}}{\partial \theta_k} = -\frac{1}{x_{mk}} \quad (4.25)$$

$$\frac{\partial M_{0,km}^{TCSC}}{\partial \theta_k} = \frac{1}{P_{mk}^{esp}} \quad \frac{\partial M_{0,km}^{TCSC}}{\partial \theta_m} = -\frac{1}{P_{mk}^{esp}} \quad (4.26)$$

$$\frac{\partial M_{0,km}^{TCSC}}{\partial x_{km}^{TCSC}} = -1 \quad (4.27)$$

onde  $\Omega_k^c$  e  $\Omega_m^c$  dizem respeito à todas as barras comuns vizinhas às barras  $k$  e  $m$ .

Após a formação da matriz  $\mathbf{H}^{ext}$ , a matriz ganho estendida, identificada por  $\mathbf{G}^{ext}$ , e o vetor do lado direito estendido, identificado por  $\mathbf{b}^{ext}$ , são calculados por:

$$\mathbf{G}^{ext} = \left[ \mathbf{H}^{ext} \right]^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}^{ext} \quad (4.28)$$

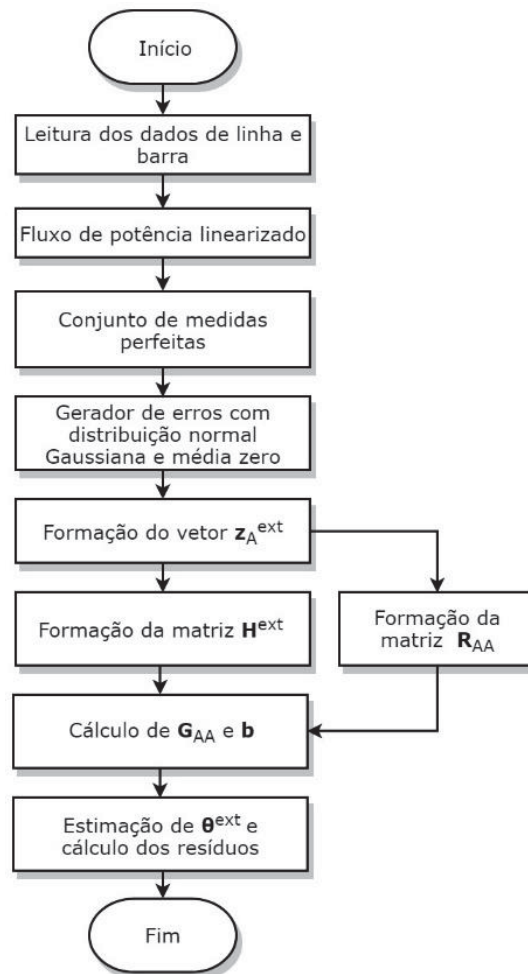
$$\mathbf{b}^{ext} = \left[ \mathbf{H}^{ext} \right]^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{z}_A^{ext} \quad (4.29)$$

A estimativa para o vetor de variáveis de estado estendido é obtida ao resolver o sistema linear resultante para  $\hat{\boldsymbol{\theta}}^{ext}$ :

$$\mathbf{G}^{ext} \hat{\boldsymbol{\theta}}^{ext} = \mathbf{b}^{ext} \quad (4.30)$$

O fluxograma completo do algoritmo do método TCSC-LSE é mostrado na FIGURA 4.3.

FIGURA 4.3 - FLUXOGRAMA DO MÉTODO TCSC-LSE



FONTE: O autor (2019).

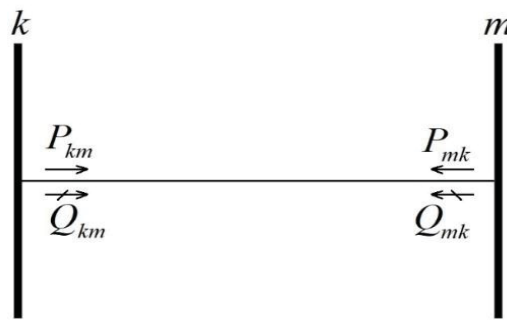
A análise do impacto causado pelos TCSCs nos sistemas de transmissão a partir de uma abordagem linearizada permite, de forma simplificada e aproximada, verificar como o dispositivo opera no controle dos fluxos de potência ativa nos ramos. Nesse sentido, o TCSC-LSE possui aplicações na determinação dos parâmetros dos TCSCs a fim de que sejam mantidos os fluxos de potência ativa especificados nos ramos controlados. Ao trabalhar com métodos iterativos como o fluxo de carga baseado no método Newton-Raphson ou estimadores de estados baseados no método MQP tradicional, o TCSC-LSE pode ser usado como ferramenta para determinar uma melhor aproximação para a "partida inicial" das variáveis de estado do sistema em análise, o que pode resultar na melhoria das características de convergência de tais métodos. Investigações sobre a influência da utilização do TCSC-LSE na inicialização das variáveis de estado de sistemas com TCSC em métodos iterativos não são contempladas no presente trabalho.

## 4.2 ESTIMADOR DE ESTADO DESACOPLADO-RÁPIDO COM FACTS

### 4.2.1 Modelagem não linear do TCSC

De maneira semelhante ao que foi feito no *TCSC-LSE*, o desenvolvimento de um estimador de estado não linear para sistemas de transmissão com *TCSCs* se inicia com o desenvolvimento de uma modelagem para o referido dispositivo. Para tanto, considera-se um ramo genérico que conecta as barras  $k$  e  $m$ , conforme ilustrado na FIGURA 4.4:

FIGURA 4.4 – RAMO GENÉRICO QUE CONECTA AS BARRAS  $k$  E  $m$



FONTE: O autor (2020).

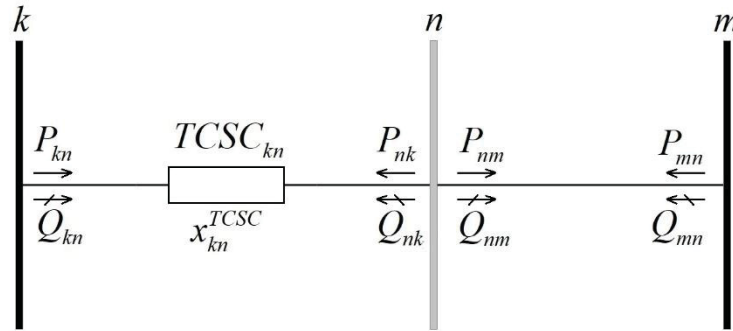
onde:

$P_{km}$  e  $P_{mk}$  são os fluxos de potência ativa de  $k$  para  $m$  e de  $m$  para  $k$ , respectivamente;

$Q_{km}$  e  $Q_{mk}$  são os fluxos de potência reativa de  $k$  para  $m$  e de  $m$  para  $k$ , respectivamente.

Um *TCSC* é inserido no ramo  $k - m$  com intuito de controlar o fluxo de potência ativa  $P_{km}$ , assim, a barra de conexão  $n$  é acrescentada entre as barras  $k$  e  $m$ , conforme ilustrado na FIGURA 4.5.

FIGURA 4.5 - TCSC RESPONSÁVEL PELO CONTROLE DO FLUXO DE POTÊNCIA ATIVA NO RAMO  $k - m$



FONTE: O autor (2020).

onde:

$P_{kn} = P_{kn}^{TCSC}$  é o fluxo de potência ativa controlado pelo TCSC;

$P_{nk} = P_{nk}^{TCSC}$  é o fluxo de potência ativa que deixa a barra  $n$ ;

$Q_{kn} = Q_{kn}^{TCSC}$  é o fluxo de potência reativa que deixa a barra  $k$ ;

$Q_{nk} = Q_{nk}^{TCSC}$  é o fluxo de potência reativa que deixa a barra  $n$ ;

$P_{nm}$  e  $Q_{nm}$  são os fluxos de potência ativa e reativa que deixam a barra  $n$ , respectivamente;

$P_{mn}$  e  $Q_{mn}$  são os fluxos de potência ativa e reativa que deixam a barra  $m$ , respectivamente;

$x_{kn}^{TCSC}$  é a reatância equivalente de  $TCSC_{kn}$  necessária para manter o fluxo  $P_{kn}^{TCSC}$  em um valor de controle especificado.

A barra  $n$  é acrescentada para representar o ponto de conexão do TCSC com a linha de transmissão ou alimentador cujo fluxo de potência ativa deseja-se controlar, diferentemente das barras tradicionais da modelagem barra-ramo que podem representar subestações ou entroncamentos. Para o estudo de fluxo de carga em sistemas com TCSCs, a barra/nó  $n$  recebe o mesmo tratamento de uma barra de passagem (ou barra de injeção nula). Considerando que  $nTCSC$  seja o número de TCSCs instalados na rede, serão inseridas  $nTCSC$  novas barras de conexão ao sistema.

Em (KUMARI; PRIYANKA; SYDULU, 2006) os autores utilizam uma modelagem alternativa para o TCSC, que considera que a impedância total do ramo  $k - m$  seja composta por uma parcela fixa, referente ao elemento passivo responsável por conectar as barras  $k$  e  $m$ , e uma parcela variável referente à reatância equivalente do TCSC. Essa abordagem dispensa a adição de uma barra adicional de



conexão para cada controlador presente no sistema, porém implica em alterações na matriz de admitâncias de barra a cada iteração, o que adiciona um grau extra de complexidade ao problema.

Considerando a modelagem apresentada na FIGURA 4.5, as expressões para os fluxos de potência ativa e reativa no ramo  $k - n$  são dadas por:

$$P_{kn}^{TCSC} = V_k V_n B_{kn}^{TCSC} \sen \theta_{kn} \quad (4.31)$$

$$Q_{kn}^{TCSC} = -V_k^2 B_{kk}^{TCSC} - V_k V_n B_{kn}^{TCSC} \cos \theta_{kn} \quad (4.32)$$

onde, para um TCSC que opera na região indutiva:

$$B_{kk}^{TCSC} = B_{nn}^{TCSC} = -\frac{1}{x_{kn}^{TCSC}};$$

$$B_{kn}^{TCSC} = B_{nk}^{TCSC} = \frac{1}{x_{kn}^{TCSC}}.$$

Para um TCSC que opera na região capacitiva, os sinais em  $B_{kk}^{TCSC}$  e  $B_{kn}^{TCSC}$  são trocados. As expressões para  $P_{nk}^{TCSC}$  e  $Q_{nk}^{TCSC}$  são obtidas ao inverter os subíndices  $k$  e  $n$  em (4.31) e (4.32).

Os fluxos de potência ativa  $P_{nm}$  e  $P_{mn}$ , e os fluxos de potência reativa  $Q_{nm}$  e  $Q_{mn}$  são calculados pelas expressões gerais dos fluxos de potência expressas por (3.19) e (3.20), cujos parâmetros são ajustados de acordo com o QUADRO 1 apresentado na seção 3.1.2.1, em função do tipo de equipamento existente no ramo  $n - m$ .

Considerando apenas a influência exercida por  $TCSC_{kn}$ , a injeção de potência ativa na barra  $k$  é igual a  $P_{kn}^{TCSC}$ , enquanto que na barra  $n$  é igual a  $P_{nk}^{TCSC}$ . O mesmo vale para as injeções de potência reativa nas barras terminais do controlador, assim:

$$P_k^{TCSC} = P_{kn}^{TCSC} = V_k V_n B_{kn}^{TCSC} \sen \theta_{kn} \quad (4.33)$$

$$Q_k^{TCSC} = Q_{kn}^{TCSC} = -V_k^2 B_{kk}^{TCSC} - V_k V_n B_{kn}^{TCSC} \cos \theta_{kn} \quad (4.34)$$

As expressões para  $P_n^{TCSC}$  e  $Q_n^{TCSC}$  são obtidas ao inverter os subíndices  $k$  e  $n$  em (4.33) e (4.34). As metodologias adotadas para inserir o TCSC no gerador de grandezas medidas e no estimador de estados baseado na formulação *EE-DR* são apresentadas a seguir.

#### 4.2.2 Gerador de grandezas medidas não linear para sistemas com TCSCs

Conforme apresentado na Seção 3.1.2, o *FCDR* modificado é utilizado como gerador de grandezas medidas para o estimador de estado desacoplado-rápido para sistemas com *TCSC* proposto no presente trabalho. Assim, com intuito de aprofundar o estudo dos métodos desacoplados de análise de sistemas de potência, o controlador *TCSC* é incluído na formulação do *FCDR*, cuja resposta fornecerá as variáveis de estado calculadas, utilizadas para a obtenção do conjunto de medidas que alimenta o estimador.

Em função do modelo não linear do *TCSC* apresentado na Seção 4.2.1, o parâmetro de controle dos controladores é inserido como uma nova variável de estado para o problema de *FCDR*. O vetor  $\mathbf{x}$  de variáveis de estado passa a ser dado por:

$$\mathbf{x} = [\mathbf{x}_A \quad \vdots \quad \mathbf{x}_R]^T \quad (4.35)$$

$$\mathbf{x}_A = [\boldsymbol{\theta} \quad \mathbf{x}^{TCSC}]^T \quad (4.36)$$

$$\mathbf{x}_R = [\mathbf{V}] \quad (4.37)$$

onde:

$\mathbf{x}_A$  é um vetor que compreende as variáveis de estado do problema ativo;

$\mathbf{x}_R$  é um vetor que compreende as variáveis de estado do problema reativo;

$\boldsymbol{\theta}$  é o vetor dos ângulos das tensões nas barras do sistema, de dimensão  $nb$ ;

$\mathbf{x}^{TCSC}$  é o vetor das reatâncias equivalentes dos controladores presentes no sistema, de dimensão  $nTCSC$ ;

$\mathbf{V}$  é o vetor dos módulos das tensões nas barras do sistema, de dimensão  $nb$ .

A principal função do *TCSC* em um sistema de energia está relacionada a manter o fluxo de potência ativa no ramo controlado em um valor especificado. Considerando o ramo controlado por um *TCSC* mostrado na FIGURA 4.5, onde deseja-se manter o fluxo de potência ativa  $P_{kn}^{REG}$ , o vetor  $\Delta \mathbf{P}$  de resíduos das injeções de potência ativa do subproblema ativo do *FCDR* é modificado da seguinte forma:

$$\Delta \mathbf{P} = \begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta P_m \\ \Delta P_n \\ \Delta P_{kn}^{REG} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_k^{ESP} - P_k^{CALC} \\ P_m^{ESP} - P_m^{CALC} \\ P_n^{ESP} - P_n^{CALC} \\ P_{kn}^{TCSC,REG} - P_{kn}^{TCSC,CALC} \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

O resíduo  $\Delta P_m$ , referente à injeção de potência ativa na barra comum  $m$  é calculado normalmente conforme a formulação do tradicional do *FCDR*. O cálculo dos resíduos de injeções de potência ativa nas barras terminais do *TCSC*,  $\Delta P_k$  e  $\Delta P_n$ , é discutido a seguir.

Considera-se que as injeções de potência ativa nas barras terminais do *TCSC*,  $k$  e  $n$ , são compostas por duas parcelas: uma referente à influência das barras comuns vizinhas a  $k$  e  $n$ , e outra referente ao fluxo de potência ativa controlado pelo *TCSC*. Considerando que o *TCSC* seja responsável por controlar o fluxo de potência ativa que flui de  $k$  para  $n$ , as injeções de potência ativa nas barras  $k$  e  $n$  são calculadas como:

$$P_k^{CALC} = P_k^{rede} + P_k^{TCSC} \quad (4.39)$$

$$P_n^{CALC} = P_n^{rede} + P_n^{TCSC} \quad (4.40)$$

$$P_k^{rede} = V_k^2 G_{kk} + V_k \sum_{l \in \Omega^c k} V_l (G_{kl} \cos \theta_{kl} + B_{kl} \sin \theta_{kl}) \quad (4.41)$$

$$P_k^{TCSC} = P_{kn}^{TCSC} = V_k V_n B_{kn}^{TCSC} \sin \theta_{kn} \quad (4.42)$$

$$P_n^{rede} = V_n^2 G_{nn} + V_n \sum_{m \in \Omega^c n} V_m (G_{nm} \cos \theta_{nm} + B_{nm} \sin \theta_{nm}) \quad (4.43)$$

$$P_n^{TCSC} = P_{nk}^{TCSC} = V_n V_k B_{nk}^{TCSC} \sin \theta_{nk} \quad (4.44)$$

onde:

$P_k^{rede}$  e  $P_n^{rede}$  são as parcelas de potência ativa que deixam as barras  $k$  e  $n$  em direção às barras comuns vizinhas a  $k$  e  $n$ ;

$P_{kn}^{TCSC}$  e  $P_{nk}^{TCSC}$  são as parcelas de potência ativa que deixam as barras  $k$  e  $n$  influenciadas pelo controle exercido pelo *TCSC*;

$\Omega^c k$  e  $\Omega^c n$  compreendem os conjuntos de barras comuns vizinhas às barras  $k$  e  $n$ .

No cálculo do resíduo do fluxo de potência ativa especificado para o ramo controlado  $\Delta P_{kn}^{REG}$ , têm-se:

$$\Delta P_{kn}^{REG} = P_{kn}^{TCSC,REG} - P_{kn}^{TCSC,CALC} \quad (4.45)$$

onde:

$P_{kn}^{TCSC,REG}$  é o valor de fluxo de potência ativa especificado para o ramo controlado;

$P_{kn}^{TCSC,CALC}$  é o fluxo de potência ativa calculado por (4.31) a partir das variáveis de estado do problema.

Em função das modificações feitas no vetor de variáveis de estado e no vetor de resíduos de injeções de potência ativa, a matriz  $\mathbf{B}'$  do *FCDR* também é alterada e passa a ser chamada de  $\mathbf{B}'_{TCSC}$ . Acrescentando-se as linhas e colunas referentes aos *TCSCs* presentes no sistema,  $\mathbf{B}'_{TCSC}$  passa a ter dimensões  $(nb + nTCSC - 1) \times (nb + nTCSC - 1)$ , atualizada a cada iteração e escrita como:

$$\mathbf{B}'_{TCSC} = \begin{bmatrix} & & & & \frac{\partial P_k}{\partial x_{kn}^{TCSC}} \\ & & & & \frac{\partial P_m}{\partial x_{kn}^{TCSC}} \\ & & & & \frac{\partial P_n}{\partial x_{kn}^{TCSC}} \\ & \mathbf{B}'_{mod} & & & \\ \frac{\partial P_{kn}^{REG}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{kn}^{REG}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{kn}^{REG}}{\partial \theta_n} & & \frac{\partial P_{kn}^{REG}}{\partial x_{kn}^{TCSC}} \end{bmatrix} \quad (4.46)$$

onde:

$$\frac{\partial P_k}{\partial x_{kn}^{TCSC}} = \frac{\partial P_{kn}^{REG}}{\partial x_{kn}^{TCSC}} = -V_k V_n \sin \theta_{kn} \left( \frac{1}{x_{kn}^{TCSC}} \right)^2 \quad (4.47)$$

$$\frac{\partial P_m}{\partial x_{kn}^{TCSC}} = \frac{\partial P_{kn}^{REG}}{\partial \theta_m} = 0 \quad (4.48)$$

$$\frac{\partial P_n}{\partial x_{kn}^{TCSC}} = -V_n V_k B_{kn}^{TCSC} \sin \theta_{nk} \left( \frac{1}{x_{kn}^{TCSC}} \right)^2 \quad (4.49)$$

$$\frac{\partial P_{kn}^{REG}}{\partial \theta_k} = V_k V_n B_{kn}^{TCSC} \cos \theta_{kn} \quad (4.50)$$

$$\frac{\partial P_{kn}^{REG}}{\partial \theta_n} = -V_k V_n B_{kn}^{TCSC} \cos \theta_{kn} \quad (4.51)$$

A submatriz  $\mathbf{B}'_{mod}$  possui dimensões  $(nb - 1) \times (nb - 1)$ , e pode ser dividida em duas parcelas:

$$\mathbf{B}'_{mod} = \mathbf{B}' + \mathbf{B}'_{inj,TCSC} \quad (4.52)$$

onde:

$\mathbf{B}'$  é idêntica à matriz  $\mathbf{B}'$  do *FCDR*, constante e computada apenas em função dos parâmetros da rede;

$\mathbf{B}'_{\text{inj},\text{TCSC}}$  corresponde à matriz de derivadas parciais das injeções de potência ativa nas barras terminais do TCSC com relação aos ângulos de tensão, de dimensões iguais às de  $\mathbf{B}'$ , atualizada a cada iteração em função do valor atual das variáveis de estado, dada por:

$$\mathbf{B}'_{\text{inj},\text{TCSC}} = \frac{\partial \mathbf{P}_{\text{inj}}^{\text{TCSC}}}{\partial \boldsymbol{\theta}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k^{\text{TCSC}}}{\partial \theta_k} & 0 & \frac{\partial P_k^{\text{TCSC}}}{\partial \theta_n} \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial P_n^{\text{TCSC}}}{\partial \theta_k} & 0 & \frac{\partial P_n^{\text{TCSC}}}{\partial \theta_n} \end{bmatrix} \quad (4.53)$$

onde:

$$\frac{\partial P_k^{\text{TCSC}}}{\partial \theta_k} = \frac{\partial P_{kn}^{\text{REG}}}{\partial \theta_k} = V_k V_n B_{kn}^{\text{TCSC}} \cos \theta_{kn} \quad (4.54)$$

$$\frac{\partial P_k^{\text{TCSC}}}{\partial \theta_n} = \frac{\partial P_{kn}^{\text{REG}}}{\partial \theta_n} = -V_k V_n B_{kn}^{\text{TCSC}} \cos \theta_{kn} \quad (4.55)$$

$$\frac{\partial P_n^{\text{TCSC}}}{\partial \theta_k} = -V_n V_k B_{nk}^{\text{TCSC}} \cos \theta_{nk} \quad (4.56)$$

$$\frac{\partial P_n^{\text{TCSC}}}{\partial \theta_n} = V_n V_k B_{nk}^{\text{TCSC}} \cos \theta_{nk} \quad (4.57)$$

O sistema resultante a ser resolvido na meia iteração ativa do *FCDR* para sistemas com TCSC é dado por:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta P_m \\ \Delta P_n \\ \Delta P_{kn}^{\text{REG}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & & \frac{\partial P_k}{\partial x_{kn}^{\text{TCSC}}} \\ & \mathbf{B}'_{\text{mod}} & & \frac{\partial P_m}{\partial x_{kn}^{\text{TCSC}}} \\ & & & \frac{\partial P_n}{\partial x_{kn}^{\text{TCSC}}} \\ \frac{\partial P_{kn}^{\text{REG}}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{kn}^{\text{REG}}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{kn}^{\text{REG}}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_{kn}^{\text{REG}}}{\partial x_{kn}^{\text{TCSC}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta \theta_m \\ \Delta \theta_n \\ \Delta x_{kn}^{\text{TCSC}} \end{bmatrix} \quad (4.58)$$

Os valores dos ângulos das tensões nas barras e das reatâncias equivalentes dos TCSCs são atualizados a cada iteração da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta}^{v+1} \\ \mathbf{x}_{\text{TCSC}}^{v+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta}^v \\ \mathbf{x}_{\text{TCSC}}^v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta}^v \\ \Delta \mathbf{x}_{\text{TCSC}}^v \end{bmatrix} \quad (4.59)$$

A inserção de *TCSCs* no sistema também reflete em alterações na meia iteração reativa do *FCDR*. Semelhantemente ao que acontece no vetor de resíduos de injeção de potência ativa  $\Delta \mathbf{P}$ , o vetor de resíduos de injeção de potência reativa  $\Delta \mathbf{Q}$  é modificado da seguinte forma:

$$\Delta \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \Delta Q_k \\ \Delta Q_m \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_k^{ESP} - Q_k^{CALC} \\ Q_m^{ESP} - Q_m^{CALC} \\ Q_n^{ESP} - Q_n^{CALC} \end{bmatrix} \quad (4.60)$$

O resíduo  $\Delta Q_m$ , referente à injeção de potência ativa na barra comum  $m$ , é calculado de acordo com a formulação tradicional do *FCDR*. O cálculo das injeções de potência reativa nas barras  $k$  e  $n$ , necessário para a obtenção dos resíduos das injeções de potência reativa  $\Delta Q_k$  e  $\Delta Q_n$ , envolve um raciocínio semelhante ao aplicado no cálculo de  $\Delta P_k$  e  $\Delta P_n$ , ou seja:

$$Q_k^{CALC} = Q_k^{rede} + Q_k^{TCSC} \quad (4.61)$$

$$Q_n^{CALC} = Q_n^{rede} + Q_n^{TCSC} \quad (4.62)$$

$$Q_k^{rede} = -V_k^2 B_{kk} + V_k \sum_{l \in \Omega^c k} V_l (G_{kl} \sin \theta_{kl} - B_{kl} \cos \theta_{kl}) \quad (4.63)$$

$$Q_k^{TCSC} = Q_{kn}^{TCSC} = -V_k^2 B_{kk}^{TCSC} - V_k V_n B_{kn}^{TCSC} \cos \theta_{kn} \quad (4.64)$$

$$Q_n^{rede} = -V_n^2 B_{nn} + V_n \sum_{m \in \Omega^c n} V_m (G_{nm} \sin \theta_{nm} - B_{nm} \cos \theta_{nm}) \quad (4.65)$$

$$Q_n^{TCSC} = Q_{nk}^{TCSC} = -V_n^2 B_{nn}^{TCSC} - V_n V_k B_{nk}^{TCSC} \cos \theta_{nk} \quad (4.66)$$

onde:

$Q_k^{rede}$  e  $Q_n^{rede}$  são as parcelas de potência reativa que deixam as barras  $k$  e  $n$  em direção às barras comuns vizinhas a  $k$  e  $n$ ;

$Q_{kn}^{TCSC}$  e  $Q_{nk}^{TCSC}$  são as parcelas de potência reativa que deixam as barras  $k$  e  $n$  influenciada pela reatância equivalente do *TCSC*;

$\Omega^c k$  e  $\Omega^c n$  compreendem os conjuntos de barras comuns vizinhas às barras  $k$  e  $n$ .

As alterações feitas em  $\Delta \mathbf{Q}$  refletem em modificações na matriz  $\mathbf{B}''$ , que passa a ser chamada de  $\mathbf{B}_{\text{mod}}''$ . Diferentemente do que acontece na matriz  $\mathbf{B}_{\text{mod}}'$ , as dimensões de  $\mathbf{B}_{\text{mod}}''$  não são alteradas em função da presença de *TCSCs* no sistema. Isso ocorre pelo fato da nova variável de estado associada aos *TCSCs* ( $x^{TCSC}$ )

pertencer ao subproblema ativo, mantendo as dimensões  $(n_{PQ}) \times (n_{PQ})$  do *FCDR* tradicional. A matriz  $\mathbf{B}_{\text{mod}}''$  também pode ser dividida em duas parcelas, da seguinte forma:

$$\mathbf{B}_{\text{mod}}'' = \mathbf{B}'' + \mathbf{B}_{\text{inj,TCSC}}'' \quad (4.67)$$

onde:

$\mathbf{B}''$  é idêntica à matriz  $\mathbf{B}''$  do *FCDR*, constante e computada apenas em função dos parâmetros da rede;

$\mathbf{B}_{\text{inj,TCSC}}''$  corresponde à matriz das derivadas das injeções de potência reativa nas barras terminais do *TCSC* com relação aos módulos de tensão, de dimensões iguais às de  $\mathbf{B}''$ , atualizada a cada iteração em função do valor atual das variáveis de estado, dada por:

$$\mathbf{B}_{\text{inj,TCSC}}'' = \frac{\partial \mathbf{Q}_{\text{inj}}^{\text{TCSC}}}{\partial \mathbf{V}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_k^{\text{TCSC}}}{\partial V_k} & 0 & \frac{\partial Q_k^{\text{TCSC}}}{\partial V_n} \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial Q_n^{\text{TCSC}}}{\partial V_k} & 0 & \frac{\partial Q_n^{\text{TCSC}}}{\partial V_n} \end{bmatrix} \quad (4.68)$$

onde:

$$\frac{\partial Q_k^{\text{TCSC}}}{\partial V_k} = -2V_k B_{kk}^{\text{TCSC}} - V_n B_{kn}^{\text{TCSC}} \cos \theta_{kn} \quad (4.69)$$

$$\frac{\partial Q_k^{\text{TCSC}}}{\partial V_n} = -V_k B_{kn}^{\text{TCSC}} \cos \theta_{kn} \quad (4.70)$$

$$\frac{\partial Q_n^{\text{TCSC}}}{\partial V_k} = -V_n B_{nk}^{\text{TCSC}} \cos \theta_{nk} \quad (4.71)$$

$$\frac{\partial Q_n^{\text{TCSC}}}{\partial V_n} = -2V_n B_{nn}^{\text{TCSC}} - V_k B_{nk}^{\text{TCSC}} \cos \theta_{nk} \quad (4.72)$$

Dessa forma, o sistema a ser resolvido no subproblema reativo do *FCDR* para sistemas com *TCSC* é dado por:

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_k \\ \Delta Q_m \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{\text{mod}}'' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_k \\ \Delta V_m \\ \Delta V_n \end{bmatrix} \quad (4.73)$$

Os valores dos módulos das tensões nas barras são atualizados a cada iteração de acordo com a formulação tradicional do *FCDR*. Os ângulos e módulos das tensões nas barras são inicializados em condições de partida *flat*, enquanto que as

reatâncias equivalentes do *TCSC* são inicializadas com metade das reatâncias dos ramos controlados, ou seja:

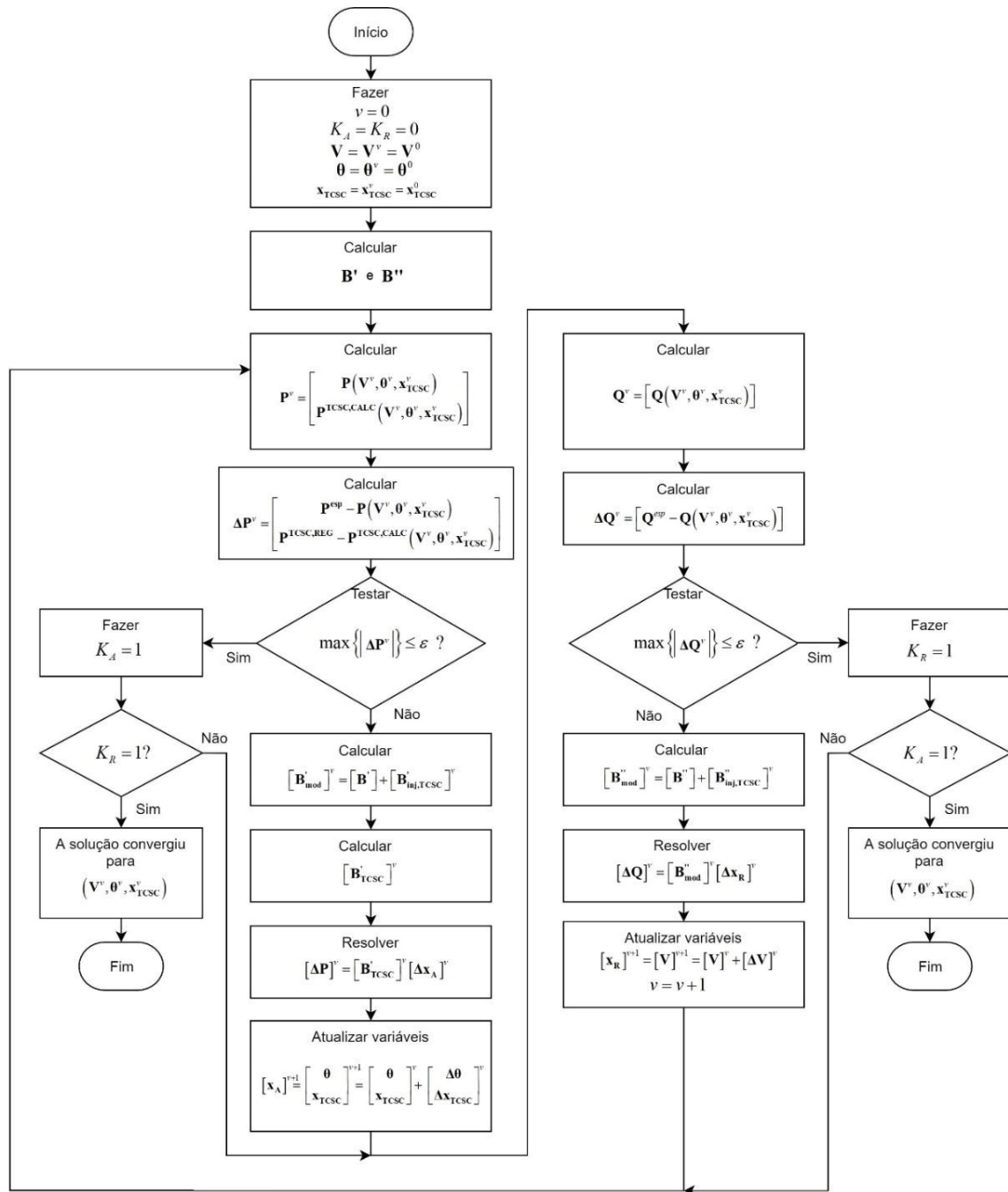
$$\left[ x_{kn}^{TCSC} \right]^0 = \frac{x_{km}}{2} \quad (4.74)$$

O processo iterativo é continuado até que os módulos de  $\Delta \mathbf{P}$ ,  $\Delta \mathbf{P}_{TCSC}^{REG}$  e  $\Delta \mathbf{Q}$  sejam inferiores à tolerância pré-estabelecida, conforme a formulação do *FCDR* tradicional. A partir das variáveis de estado obtidas na solução convergida do *FCDR* para sistemas com *TCSC*, as medidas de fluxo de potência nos ramos comuns e injeção de potência nas barras comuns são calculadas a partir das funções de medição apresentadas na Seção 3.1.2.1.

A expressão (4.31) é utilizada como função de medição para o fluxo de potência ativa nos ramos controlados, e a expressão (4.32) como função de medição para o fluxo de potência reativa. A expressão (4.39) é usada como função de medição para as injeções de potência ativa nas barras terminais dos controladores enquanto que a expressão (4.40) é usada como função de medição para as injeções de potência reativa. Antes de fornecer o conjunto completo de medidas ao estimador de estado, são acrescentadas às medidas calculadas (perfeitas), erros aleatórios com distribuição normal gaussiana, conforme disposto na Seção 3.1.2.2. O fluxograma completo do *FCDR* para sistemas com *TCSCs* é apresentado na FIGURA 4.6.



FIGURA 4.6 - FLUXOGRAMA DO FCDR PARA SISTEMAS COM TCSC



FONTE: O autor (2020).

#### 4.2.3 Estimador de estado desacoplado-rápido para sistemas com TCSC

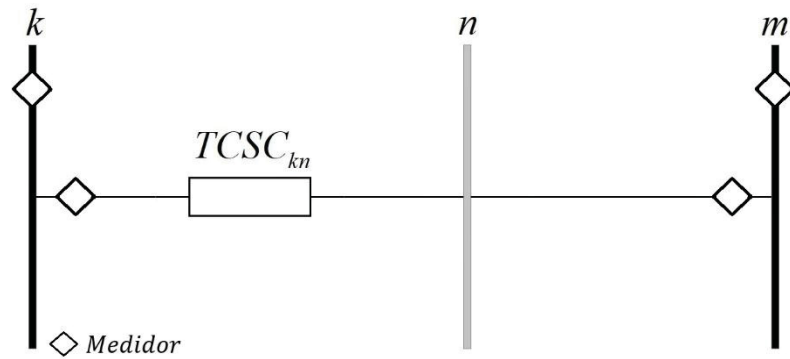
Atendendo ao objetivo principal do presente trabalho de pesquisa, procede-se com o desenvolvimento de um estimador de estado baseado na formulação de

mínimos quadrados ponderados desacoplado-rápido, capaz de processar sistemas de transmissão que contém o controlador *FACTS TCSC*. A formulação do estimador de estado resultante, designado por *Thyristor Controlled Series Capacitor State Estimator*, ou *TCSC-SE*, é apresentada detalhadamente nessa Seção.

Considerando o ramo  $k-m$  da FIGURA 4.5, onde um *TCSC* é inserido para controlar o fluxo de potência ativa que flui da barra  $k$  para a barra  $m$ , de acordo com a modelagem apresentada na Seção 4.2.1, uma barra adicional  $n$  é inserida no ponto de conexão do *TCSC* com a linha de transmissão. Assim, o *TCSC* passa a ser referido como  $TCSC_{kn}$  e a linha de transmissão por *linha  $n-m$* .

No caso em que o ramo  $k-m$  seja monitorado pelo sistema *SCADA*, são monitorados os módulos de tensão e injeções de potência nas barras  $k$  e  $m$ , e os fluxos de potência  $k-m$  e  $m-k$ . A priori considera-se que as injeções de potência em  $n$  não sejam monitoradas, assim, têm-se a configuração de medidores ilustrada na FIGURA 4.7.

FIGURA 4.7 - MEDIDAS EM UM RAMO CUJO FLUXO DE POTÊNCIA ATIVA É CONTROLADO POR *TCSC*



FONTE: O autor (2020).

O vetor de medidas para a configuração da FIGURA 4.7 é dado por:

$$\mathbf{z} = [\mathbf{z}_A \mid \mathbf{z}_R]^T = [P_k \quad P_m \quad P_{kn} \quad P_{mk} \mid Q_k \quad Q_m \quad Q_{kn} \quad Q_{mk} \quad V_k \quad V_m]^T \quad (4.75)$$

#### 4.2.3.1 Funções de medição

Nessa Seção são apresentadas as funções de medição para o ramo controlado por *TCSC* disposto na FIGURA 4.7. Para tanto, considera-se que as

variáveis de estado associadas à barra adicional  $n$  sejam conhecidas, uma vez que a solução convergida do  $TCSC$ - $SE$  engloba tais grandezas. Os fluxos de potência  $k-m$  e  $m-k$  podem ser expressos como:

$$P_{km} = P_{kn}^{TCSC} = V_k V_n B_{kn}^{TCSC} \sen \theta_{kn} \quad (4.76)$$

$$P_{mk} = P_{mn} = (a_{mn} V_m)^2 g_{mn} - (a_{mn} V_m) V_n [g_{mn} \cos(\theta_{mn} + \varphi_{mn}) + b_{mn} \sen(\theta_{mn} + \varphi_{mn})] \quad (4.77)$$

$$Q_{km} = Q_{kn}^{TCSC} = -V_k^2 B_{kk}^{TCSC} - V_k V_n B_{kn}^{TCSC} \cos \theta_{kn} \quad (4.78)$$

$$Q_{mk} = Q_{mn} = -(a_{mn} V_m)^2 (b_{mn} + b_{mn}^{sh}) - (a_{mn} V_m) V_n [g_{mn} \sen(\theta_{mn} + \varphi_{mn}) - b_{mn} \cos(\theta_{mn} + \varphi_{mn})] \quad (4.79)$$

A representação do nó de conexão entre o controlador e a  $LT$  na modelagem proposta (barra adicional  $n$ ) permite que os fluxos de potência  $k-m$  sejam calculados em função da reatância equivalente de  $TCSC_{kn}$  e das variáveis de estado das barras  $k$  e  $n$ , e que os fluxos de potência  $m-k$  sejam calculados em função dos parâmetros do elemento passivo que conecta  $m$  à  $n$  e das variáveis de estado associados a essas barras. O controlador  $TCSC_{kn}$  é um elemento puramente reativo responsável por manter o fluxo de potência ativa  $P_{kn}$  em um valor desejado, assim, apesar de serem calculados por diferentes expressões, é verdadeira a relação  $P_{kn} = -P_{nk}$ .

Para a injeção de potência ativa na barra  $k$ , têm-se:

$$P_k = P_k^{Re de} + P_{kn}^{TCSC} \quad (4.80)$$

$$P_k^{Re de} = V_k^2 G_{kk} + V_k \sum_{l \in \Omega^c k} V_l (G_{kl} \cos \theta_{kl} + B_{kl} \sen \theta_{kl}) \quad (4.81)$$

$$P_{kn}^{TCSC} = V_k V_n B_{kn}^{TCSC} \sen \theta_{kn} \quad (4.82)$$

De acordo com (4.80), a injeção de potência ativa na barra  $k$  é composta por duas parcelas:

- $P_k^{Re de}$  representa a parcela de potência ativa injetada em  $k$  que sofre influência dos elementos passivos conectados a  $k$  e das barras vizinhas pertencentes ao conjunto  $\Omega^c k$ ;
- $P_{kn}^{TCSC}$  representa o fluxo de potência ativa que flui através de  $TCSC_{kn}$ .

Por outro lado, potência ativa injetada na barra  $m$  é influenciada apenas pelas barras vizinhas e elementos passivos conectados à  $m$ , ou seja, a injeção de potência ativa  $P_m$  não é influenciada diretamente pelo valor de  $x_{kn}^{TCSC}$ . Assim,  $P_m$  é calculada apenas em função das variáveis de estado associadas às barras vizinhas à  $m$ , incluindo-se a barra terminal  $n$ . A injeção de potência ativa na barra  $m$  é dada por:

$$P_m = P_m^{Re} = V_m^2 G_{mm} + V_m \sum_{l \in \Omega m} V_l (G_{ml} \cos \theta_{ml} + B_{ml} \sin \theta_{ml}) \quad (4.83)$$

onde:

$\Omega m$  representa o conjunto de barras vizinhas à  $m$ , compostas por uma ou mais barras comuns e  $n$ , ou seja,  $\Omega m = \Omega^c m + n$ .

O mesmo raciocínio aplica-se às expressões de injeção de potência reativa, assim:

$$Q_k = Q_k^{Re} + Q_k^{TCSC} \quad (4.84)$$

$$Q_k^{Re} = -V_k^2 B_{kk} + V_k \sum_{l \in \Omega^c k} V_l (G_{kl} \sin \theta_{kl} - B_{kl} \cos \theta_{kl}) \quad (4.85)$$

$$Q_k^{TCSC} = -V_k^2 B_{kk}^{TCSC} - V_k V_n B_{kn}^{TCSC} \cos \theta_{kn} \quad (4.86)$$

$$Q_m = Q_m^{Re} \quad (4.87)$$

$$Q_m^{Re} = -V_m^2 B_{mm} + V_m \sum_{l \in \Omega m} V_l (G_{ml} \sin \theta_{ml} - B_{ml} \cos \theta_{ml}) \quad (4.88)$$

onde:

$\Omega^c k$  corresponde ao conjunto de barras comuns vizinhas à  $k$  e  $\Omega m = \Omega^c m + n$ .

#### 4.2.3.2 Matriz Jacobiana de medidas do problema ativo

Tomando o vetor de medidas expresso em (4.75), a matriz Jacobiana de medidas do problema ativo,  $\mathbf{H}_{AA}$ , é computada. A fim de inserir a reatância equivalente de  $TCSC_{kn}$  como variável de estado no  $TCSC-SE$ , no problema ativo também são incluídas as derivadas parciais das funções de medição de potência ativa com relação à  $x_{kn}^{TCSC}$ . Assim, têm-se:

$$\mathbf{H}_{AA} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{AA}^{\text{Inj}} \\ \mathbf{H}_{AA}^{\text{Flow}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{P}^{\text{Inj}}}{\partial \boldsymbol{\theta}, \mathbf{x}^{\text{TCSC}}} \\ \frac{\partial \mathbf{P}^{\text{Flow}}}{\partial \boldsymbol{\theta}, \mathbf{x}^{\text{TCSC}}} \end{bmatrix} \quad (4.89)$$

De acordo com a natureza das medidas, a matriz  $\mathbf{H}_{AA}$  pode ser subdividida em duas submatrizes: (i)  $\mathbf{H}_{AA}^{\text{Inj}}$ , calculada em função das derivadas parciais das funções de medição de injeção de potência ativa em relação aos ângulos das tensões nas barras e das reatâncias equivalentes dos TCSCs; (ii)  $\mathbf{H}_{AA}^{\text{Flow}}$ , calculada em função das derivadas parciais das funções de medição de fluxo de potência ativa em relação aos ângulos de tensão nas barras e reatâncias equivalentes dos TCSCs.

A injeção de potência ativa na barra terminal de  $\text{TCSC}_{kn}$  ( $k$ ), pode ser escrita como a soma de duas parcelas, uma referente à influência dos elementos passivos da rede ( $P_k^{\text{Rede}}$ ) e a outra referente à influência exercida pela reatância equivalente do TCSC ( $P_k^{\text{TCSC}}$ ), conforme expresso em (4.80). Assim,  $\mathbf{H}_{AA}^{\text{Inj}}$  pode ser calculada como uma soma de duas matrizes:

$$\mathbf{H}_{AA}^{\text{Inj}} = \mathbf{H}_{AA}^{\text{Inj,Rede}} + \mathbf{H}_{AA}^{\text{Inj,TCSC}} \quad (4.90)$$

A matriz  $\mathbf{H}_{AA}^{\text{Inj,Rede}}$  é obtida a partir das derivadas parciais das expressões (4.81) e (4.83), escritas apenas como função da influência dos elementos passivos nas injeções de potência ativa nas barras  $k$  e  $m$ :

$$\mathbf{H}_{AA}^{\text{Inj,Rede}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k^{\text{Rede}}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k^{\text{Rede}}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k^{\text{Rede}}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_k^{\text{Rede}}}{\partial x_{kn}^{\text{TCSC}}} \\ \frac{\partial P_m^{\text{Rede}}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_m^{\text{Rede}}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_m^{\text{Rede}}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_m^{\text{Rede}}}{\partial x_{kn}^{\text{TCSC}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k^{\text{Rede}}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k^{\text{Rede}}}{\partial \theta_m} & 0 & 0 \\ \frac{\partial P_m^{\text{Rede}}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_m^{\text{Rede}}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_m^{\text{Rede}}}{\partial \theta_n} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.91)$$

As variáveis de estado da barra adicional  $n$  influenciam a injeção de potência na barra  $m$ , porém não influenciam a injeção de potência na barra  $k$ . Além disso, ao considerar apenas a influência exercida pelos elementos passivos em  $P_k$  e  $P_m$ , as derivadas parciais em relação a  $x_{kn}^{\text{TCSC}}$  são nulas em  $\mathbf{H}_{AA}^{\text{Inj,Rede}}$ .

De forma similar, a matriz  $\mathbf{H}_{AA}^{\text{Inj,TCSC}}$  é obtida a partir das derivadas parciais da expressão (4.82), que reflete a influência exercida por  $TCSC_{kn}$  em  $P_k$ :

$$\mathbf{H}_{AA}^{\text{Inj,TCSC}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k^{TCSC}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k^{TCSC}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k^{TCSC}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_k^{TCSC}}{\partial x_{kn}^{TCSC}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k^{TCSC}}{\partial \theta_k} & 0 & \frac{\partial P_k^{TCSC}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_k^{TCSC}}{\partial x_{kn}^{TCSC}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.92)$$

As variáveis de estado associadas à barra  $m$  não exercerem influência em  $P_k^{TCSC}$ , ao passo que  $x_{kn}^{TCSC}$  não exerce influência em  $P_m$ , o que justifica os elementos nulos em  $\mathbf{H}_{AA}^{\text{Inj,TCSC}}$ .

A submatriz  $\mathbf{H}_{AA}^{\text{Flow}}$  é computada em função das derivadas parciais das funções de medição de fluxo de potência ativa com relação às variáveis de estado do problema ativo. Analogamente ao que é feito com a matriz submatriz Jacobiana de medidas de injeção de potência ativa, é possível escrever  $\mathbf{H}_{AA}^{\text{Flow}}$  como a soma de duas matrizes, uma computada em função das medidas de fluxo de potência ativa nos elementos passivos da rede, e outra em função das medidas de fluxo de potência ativa nos ramos controlados por TCSCs, assim:

$$\mathbf{H}_{AA}^{\text{Flow}} = \mathbf{H}_{AA}^{\text{Flow,Rede}} + \mathbf{H}_{AA}^{\text{Flow,TCSC}} \quad (4.93)$$

A matriz  $\mathbf{H}_{AA}^{\text{Flow,Rede}}$  contém as derivadas parciais das funções de medição de fluxo de potência ativa em ramos comuns (linhas de transmissão, transformadores em fase e defasadores). Considerando o ramo mostrado na FIGURA 4.7, a função da medida de fluxo  $P_{km}$  é escrita em função do parâmetro de  $TCSC_{kn}$ , enquanto que a função da medida  $P_{mk}$  é escrita em função dos parâmetros do ramo  $m-n$ . Assim,  $\mathbf{H}_{AA}^{\text{Flow,Rede}}$  é escrita como:

$$\mathbf{H}_{AA}^{\text{Flow,Rede}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial P_{mk}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial x_{kn}^{TCSC}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial P_{mn}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{mn}}{\partial \theta_n} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.94)$$

A matriz  $\mathbf{H}_{AA}^{\text{Flow,TCSC}}$  contém apenas as derivadas parciais das funções das medidas de fluxo de potência ativa nos ramos controlados por TCSCs, considerando apenas as medidas tomadas no sentido do controle exercido pelo TCSC. Para as

medidas do ramo mostrado na FIGURA 4.7, a matriz  $\mathbf{H}_{AA}^{\text{Flow,TCSC}}$  contém as derivadas parciais da função da medida  $P_{km}$ .

$$\mathbf{H}_{AA}^{\text{Flow,TCSC}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_{km}}{\partial x_{kn}^{\text{TCSC}}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{kn}^{\text{TCSC}}}{\partial \theta_k} & 0 & \frac{\partial P_{kn}^{\text{TCSC}}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_{kn}^{\text{TCSC}}}{\partial x_{kn}^{\text{TCSC}}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.95)$$

A função da medida  $P_{km}$ , tomada no sentido do controle exercido pelo TCSC, é composta pelos parâmetros de  $\text{TCSC}_{kn}$  e pelas variáveis de estado das barras  $k$  e  $n$ . Nessa situação, os elementos de  $\mathbf{H}_{AA}^{\text{Flow}}$  referentes à tal medida serão não nulos nas colunas referentes às barras terminais e à reatância do controlador, o que pode ser observado em  $\mathbf{H}_{AA}^{\text{Flow,TCSC}}$ .

No caso de os fluxos de potência do ramo controlado serem monitorados em ambas as direções, ou seja, no caso em que sejam tomadas simultaneamente as medidas  $P_{km}$  e  $P_{mk}$ , a função da medida  $P_{mk}$  é expressa apenas em função das variáveis de estado das barras  $m$  e  $n$ , e dos parâmetros do ramo  $m-n$ . Dessa forma, os elementos de  $\mathbf{H}_{AA}^{\text{Flow}}$  referentes à medida  $P_{mk}$  serão não nulos apenas nas colunas referentes às barras terminais do ramo comum  $m-n$ , como pode ser observado em  $\mathbf{H}_{AA}^{\text{Flow,Rede}}$ .

#### 4.2.3.3 Matriz Jacobiana de medidas do problema reativo

De acordo com a formulação do problema de estimação de estado apresentada na Seção 3.1.4, a matriz Jacobiana de medidas do problema reativo é computada em função das derivadas parciais das funções de medição de potência reativa (injeção e fluxo) e de módulo de tensão nas barras com relação ao vetor dos módulos de tensão.

Ao agrupar os elementos da matriz Jacobiana  $\mathbf{H}_{RR}$  em função da natureza das medidas, de forma semelhante ao que foi feito em  $\mathbf{H}_{AA}$ , são obtidas três submatrizes distintas: (i)  $\mathbf{H}_{RR}^{\text{Inj}}$ , calculada em função das derivadas parciais das

funções das medidas de injeção de potência reativa em relação ao vetor de módulos de tensão nas barras; (ii)  $\mathbf{H}_{RR}^{\text{Flow}}$ , calculada em função das derivadas parciais das funções das medidas de fluxo de potência reativa em relação ao vetor de módulos de tensão nas barras; (iii)  $\mathbf{H}_{RR}^{\text{Vmod}}$ , calculada em função das derivadas parciais das medidas dos módulos das tensões nas barras com relação ao vetor de módulos de tensão nas barras.

A matriz jacobiana de medidas do problema reativo é escrita como:

$$\mathbf{H}_{RR} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{RR}^{\text{Inj}} \\ \mathbf{H}_{RR}^{\text{Flow}} \\ \mathbf{H}_{RR}^{\text{Vmod}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{Q}^{\text{Inj}}}{\partial \mathbf{V}} \\ \frac{\partial \mathbf{Q}^{\text{Flow}}}{\partial \mathbf{V}} \\ \frac{\partial \mathbf{V}^{\text{Mod}}}{\partial \mathbf{V}} \end{bmatrix} \quad (4.96)$$

A função de medição de injeção de potência reativa na barra  $k$  é dividida em duas componentes:  $Q_k^{\text{Rede}}$ , influenciada pelo efeito dos elementos passivos da rede, e  $Q_k^{\text{TCSC}}$  que sofre influência da reatância equivalente de  $\text{TCSC}_{kn}$ . A mesma separação pode ser considerada na formação da submatriz  $\mathbf{H}_{RR}^{\text{Inj}}$ , que passa a ser escrita como a soma de duas matrizes distintas,  $\mathbf{H}_{RR}^{\text{Inj,Rede}}$  e  $\mathbf{H}_{RR}^{\text{Inj,TCSC}}$ :

$$\mathbf{H}_{RR}^{\text{Inj}} = \mathbf{H}_{RR}^{\text{Inj,Rede}} + \mathbf{H}_{RR}^{\text{Inj,TCSC}} \quad (4.97)$$

Para as medidas de potência reativa obtidas do ramo monitorado da FIGURA 4.7, a matriz  $\mathbf{H}_{RR}^{\text{Inj,Rede}}$  é computada em função das derivadas parciais das funções que representam as parcelas de injeção de potência reativa nas barras  $k$  e  $m$  influenciadas exclusivamente pelos parâmetros dos elementos passivos da rede. Para tanto, tomam-se as derivadas parciais de (4.63) e (4.65), assim:

$$\mathbf{H}_{RR}^{\text{Inj,Rede}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_k^{\text{Rede}}}{\partial V_k} & \frac{\partial Q_k^{\text{Rede}}}{\partial V_m} & \frac{\partial Q_k^{\text{Rede}}}{\partial V_n} \\ \frac{\partial Q_m^{\text{Rede}}}{\partial V_k} & \frac{\partial Q_m^{\text{Rede}}}{\partial V_m} & \frac{\partial Q_m^{\text{Rede}}}{\partial V_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_k^{\text{Rede}}}{\partial V_k} & \frac{\partial Q_k^{\text{Rede}}}{\partial V_m} & 0 \\ \frac{\partial Q_m^{\text{Rede}}}{\partial V_k} & \frac{\partial Q_m^{\text{Rede}}}{\partial V_m} & \frac{\partial Q_m^{\text{Rede}}}{\partial V_n} \end{bmatrix} \quad (4.98)$$



Ao considerar apenas os elementos passivos diretamente conectados às barras  $k$  e  $m$ , verifica-se que as variáveis de estado associadas à barra adicional  $n$  não exercem qualquer influência na injeção de potência reativa  $Q_k$ . Isso justifica a derivada parcial nula na linha referente à medida  $Q_k$  em  $\mathbf{H}_{RR}^{\text{Inj,Rede}}$ .

Por outro lado, a matriz  $\mathbf{H}_{RR}^{\text{Inj,TCSC}}$  é computada em função das derivadas parciais da função que representa a parcela de injeção de potência reativa na barra  $k$  influenciada pela reatância equivalente de  $TCSC_{kn}$ . A injeção de potência reativa na barra  $m$  é influenciada apenas pelos elementos passivos diretamente conectados à  $m$ , assim a linha referente à medida  $Q_m$  em  $\mathbf{H}_{RR}^{\text{Inj,TCSC}}$  será nula:

$$\mathbf{H}_{RR}^{\text{Inj,TCSC}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_k^{\text{TCSC}}}{\partial V_k} & \frac{\partial Q_k^{\text{TCSC}}}{\partial V_m} & \frac{\partial Q_k^{\text{TCSC}}}{\partial V_n} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_k^{\text{TCSC}}}{\partial V_k} & 0 & \frac{\partial Q_k^{\text{TCSC}}}{\partial V_n} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.99)$$

De forma similar ao que é feito na formação de  $\mathbf{H}_{RR}^{\text{Inj}}$ , a submatriz Jacobiana das medidas de fluxo de potência reativa,  $\mathbf{H}_{RR}^{\text{Flow}}$ , também pode ser escrita como a soma de duas matrizes distintas:  $\mathbf{H}_{RR}^{\text{Flow,Rede}}$ , computada em função das medidas de fluxo de potência reativa nos elementos passivos da rede, e  $\mathbf{H}_{RR}^{\text{Flow,TCSC}}$ , computada em função das medidas de fluxo de potência reativa nos ramos controlados por TCSCs:

$$\mathbf{H}_{RR}^{\text{Flow}} = \mathbf{H}_{RR}^{\text{Flow,Rede}} + \mathbf{H}_{RR}^{\text{Flow,TCSC}} \quad (4.100)$$

A matriz  $\mathbf{H}_{RR}^{\text{Flow,Rede}}$  contém as derivadas parciais das funções das medidas de fluxo de potência reativa em ramos comuns (linhas de transmissão, transformadores em fase e defasadores) com relação ao vetor de magnitudes de tensão nas barras. Considerando o ramo mostrado na FIGURA 4.7, a função de medição do fluxo  $Q_{km}$  é escrita em função do parâmetro de  $TCSC_{kn}$ , enquanto que a função de medição do fluxo  $Q_{mk}$  é escrita em função dos parâmetros do ramo  $m-n$ . Dessa forma, a linha referente à medida  $Q_{km}$  será nula em  $\mathbf{H}_{RR}^{\text{Flow,Rede}}$ :

$$\mathbf{H}_{RR}^{\text{Flow, Rede}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_k} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_m} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial Q_{mn}}{\partial V_m} & \frac{\partial Q_{mn}}{\partial V_n} \end{bmatrix} \quad (4.101)$$

A matriz  $\mathbf{H}_{RR}^{\text{Flow, TCSC}}$  está relacionada às medidas de fluxo de potência reativa nos ramos controlados por TCSCs. Considerando as medidas tomadas no sentido do fluxo de potência ativa controlado pelo TCSC, onde  $TCSC_{kn}$  é responsável por controlar o fluxo de potência ativa que flui da barra  $k$  para a barra  $m$  (vide FIGURA 4.5), a matriz  $\mathbf{H}_{RR}^{\text{Flow, TCSC}}$  será dada por:

$$\mathbf{H}_{RR}^{\text{Flow, TCSC}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{km}}{\partial V_k} & \frac{\partial Q_{km}}{\partial V_m} & \frac{\partial Q_{km}}{\partial V_n} \\ \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_k} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_m} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{kn}^{TCSC}}{\partial V_k} & 0 & \frac{\partial Q_{kn}^{TCSC}}{\partial V_n} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.102)$$

A medida  $Q_{km}$  é tomada no sentido do controle exercido pelo TCSC, assim sua função de medição é escrita como função do parâmetro de controle de  $TCSC_{kn}$  e das variáveis de estado das barras terminais do controlador, assim,  $\mathbf{H}_{RR}^{\text{Flow, TCSC}}$  possuirá elementos não nulos apenas nas colunas referentes às derivadas parciais de  $Q_{km}$  com relação aos módulos de tensão nas barras  $k$  e  $n$ .

A submatriz  $\mathbf{H}_{RR}^{\text{Vmod}}$  contém as derivadas das medidas de módulo de tensão em relação ao vetor de módulos de tensão, portanto, será composta por elementos com valor unitário nas colunas referentes às barras monitoradas:

$$\mathbf{H}_{RR}^{\text{Vmod}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_k}{\partial V_k} & \frac{\partial V_k}{\partial V_m} & \frac{\partial V_k}{\partial V_n} \\ \frac{\partial V_m}{\partial V_k} & \frac{\partial V_m}{\partial V_m} & \frac{\partial V_m}{\partial V_n} \\ \frac{\partial V_n}{\partial V_k} & \frac{\partial V_n}{\partial V_m} & \frac{\partial V_n}{\partial V_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.103)$$

#### 4.2.3.4 Medidas virtuais relacionadas às barras de conexão associadas aos controladores

Em sistemas de potência reais, o TCSC está localizado em uma subestação e é instalado em uma das extremidades de uma linha de transmissão. Essa premissa

foi levada em consideração ao desenvolver o modelo de TCSC apresentado na Seção 4.2.1, capaz de representar com grande precisão o efeito de compensação provido pelo controlador. Para efeitos de modelagem, a barra adicional  $n$  é inserida no ponto de conexão entre do controlador e a linha de transmissão cujo fluxo de potência ativa deseja-se controlar. Como comentado anteriormente, em geral, não há cargas conectadas no ponto de conexão entre o controlador e a linha de transmissão compensada, portanto a barra  $n$  pode ser modelada como uma barra de injeção nula.

Conforme apresentado na Seção 3.1.1, as injeções ativa e reativa nulas da barra  $n$  são incluídas como medidas virtuais a fim de prover maior redundância ao conjunto de medidas fornecido ao estimador. Assim, em  $\mathbf{z}_A$  e  $\mathbf{z}_R$  acrescentam-se medidas nulas referentes às injeções  $P_n$  e  $Q_n$ .

Novamente, a potência ativa injetada na barra  $n$  pode ser decomposta em duas parcelas,  $P_n^{rede}$ , influenciada pelos parâmetros dos elementos passivos e variáveis de estado das barras comuns conectadas à  $n$ , e  $P_n^{TCSC}$ , influenciada pelo parâmetro de controle de  $TCSC_{kn}$  e pelas variáveis de estado associados às barras terminais  $k$  e  $n$ , assim:

$$P_n = P_n^{rede} + P_n^{TCSC} \quad (4.104)$$

$$P_n^{rede} = V_n^2 G_{nn} + V_n \sum_{l \in \Omega^n} V_l (G_{nl} \cos \theta_{nl} + B_{nl} \sin \theta_{nl}) \quad (4.105)$$

$$P_n^{TCSC} = P_{nk}^{TCSC} = V_n V_k B_{nk}^{TCSC} \sin \theta_{nk} \quad (4.106)$$

São acrescentadas as linhas referentes à função de medição de  $P_n$  nas matrizes  $\mathbf{H}_{AA}^{\text{Inj,Rede}}$  e  $\mathbf{H}_{AA}^{\text{Inj,TCSC}}$ . A linha de derivadas parciais referentes à  $P_n^{rede}$  é acrescentada à matriz  $\mathbf{H}_{AA}^{\text{Inj,Rede}}$  da seguinte forma:

$$\mathbf{H}_{AA}^{\text{Inj,Rede}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_n^{rede}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_n^{rede}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_n^{rede}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_n^{rede}}{\partial x_{kn}^{TCSC}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial P_n^{rede}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_n^{rede}}{\partial \theta_n} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.107)$$

onde:

$$\frac{\partial P_n^{rede}}{\partial \theta_m} = V_n V_m (G_{nm} \sin \theta_{nm} - B_{nm} \cos \theta_{nm}) \quad (4.108)$$

$$\frac{\partial P_n^{\text{Rede}}}{\partial \theta_n} = V_n \sum_{l \in \Omega^n} V_l (-G_{nl} \sin \theta_{nl} + B_{nl} \cos \theta_{nl}) \quad (4.109)$$

Na matriz  $\mathbf{H}_{AA}^{\text{Inj,TCSC}}$  insere-se a linha de derivadas parciais referentes à função de medição  $P_n^{\text{TCSC}}$ :

$$\mathbf{H}_{AA}^{\text{Inj,TCSC}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_n^{\text{TCSC}}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_n^{\text{TCSC}}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_n^{\text{TCSC}}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_n^{\text{TCSC}}}{\partial x_{kn}^{\text{TCSC}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{nk}^{\text{TCSC}}}{\partial \theta_k} & 0 & \frac{\partial P_{nk}^{\text{TCSC}}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_{nk}^{\text{TCSC}}}{\partial x_{kn}^{\text{TCSC}}} \end{bmatrix} \quad (4.110)$$

onde:

$$\frac{\partial P_{nk}^{\text{TCSC}}}{\partial \theta_k} = -V_n V_k B_{nk}^{\text{TCSC}} \cos \theta_{nk} \quad (4.111)$$

$$\frac{\partial P_{nk}^{\text{TCSC}}}{\partial \theta_n} = V_n V_k B_{nk}^{\text{TCSC}} \cos \theta_{nk} \quad (4.112)$$

$$\frac{\partial P_{nk}^{\text{TCSC}}}{\partial x_{kn}^{\text{TCSC}}} = -V_n V_k \sin \theta_{nk} \left( \frac{1}{x_{kn}^{\text{TCSC}}} \right)^2 \quad (4.113)$$

O mesmo raciocínio é aplicado ao subproblema reativo com função de medição  $Q_n$ , cujas expressa por:

$$Q_n = Q_n^{\text{rede}} + Q_n^{\text{TCSC}} \quad (4.114)$$

$$Q_n^{\text{rede}} = -V_n^2 B_{nn} + V_n \sum_{l \in \Omega^n} V_l (G_{nl} \sin \theta_{nl} - B_{nl} \cos \theta_{nl}) \quad (4.115)$$

$$Q_n^{\text{TCSC}} = Q_{nk}^{\text{TCSC}} = -V_n^2 B_{nn}^{\text{TCSC}} - V_n V_k B_{nk}^{\text{TCSC}} \cos \theta_{nk} \quad (4.116)$$

As derivadas parciais de  $Q_n^{\text{Rede}}$  e  $Q_n^{\text{TCSC}}$  são computadas nas matrizes  $\mathbf{H}_{RR}^{\text{Inj,Rede}}$  e  $\mathbf{H}_{RR}^{\text{Inj,TCSC}}$ , respectivamente:

$$\mathbf{H}_{RR}^{\text{Inj,Rede}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_n^{\text{Rede}}}{\partial V_k} & \frac{\partial Q_n^{\text{Rede}}}{\partial V_m} & \frac{\partial Q_n^{\text{Rede}}}{\partial V_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial Q_n^{\text{Rede}}}{\partial V_m} & \frac{\partial Q_n^{\text{Rede}}}{\partial V_n} \end{bmatrix} \quad (4.117)$$

$$\mathbf{H}_{RR}^{\text{Inj,TCSC}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_n^{\text{TCSC}}}{\partial V_k} & \frac{\partial Q_n^{\text{TCSC}}}{\partial V_m} & \frac{\partial Q_n^{\text{TCSC}}}{\partial V_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{nk}^{\text{TCSC}}}{\partial V_k} & 0 & \frac{\partial Q_{nk}^{\text{TCSC}}}{\partial V_n} \end{bmatrix} \quad (4.118)$$

onde:

$$\frac{\partial Q_n^{\text{Rede}}}{\partial V_m} = V_n (G_{nm} \sin \theta_{nm} - B_{nm} \cos \theta_{nm}) \quad (4.119)$$

$$\frac{\partial Q_n^{\text{Rede}}}{\partial V_n} = -2V_n B_{nn} + \sum_{l \in \Omega^n} V_l (G_{nl} \sin \theta_{nl} - B_{nl} \cos \theta_{nl}) \quad (4.120)$$

$$\frac{\partial Q_{nk}^{\text{TCSC}}}{\partial V_k} = -V_n B_{nk}^{\text{TCSC}} \cos \theta_{nk} \quad (4.121)$$

$$\frac{\partial Q_{nk}^{\text{TCSC}}}{\partial V_n} = -2V_n B_{nn}^{\text{TCSC}} - V_k B_{nk}^{\text{TCSC}} \cos \theta_{nk} \quad (4.122)$$

A utilização de medidas virtuais para as injeções de potência na barra adicional  $n$  tornam o algoritmo do *TCSC-SE* mais robusto, uma vez que a inserção de medidas livres de erros em  $\mathbf{z}_A$  e  $\mathbf{z}_R$  tende a melhorar a qualidade das estimativas.

#### 4.2.3.5 Matriz ganho

Se comparada à formulação de mínimos quadrados ponderados completa, o ganho computacional inerente à formulação *EE-DR* está principalmente relacionado à utilização de matrizes ganho aproximadas, constantes e desacopladas ao longo do processo iterativo. Ao inserir a reatância variável dos *TCSCs* presentes no sistema como novas variáveis de estado para o problema de *EE*, a obtenção das matrizes ganho para os problemas ativo e reativo passa a apresentar certas particularidades, que serão descritas a seguir.

De acordo com a formulação do problema *EE-DR* apresentado na Seção 3.1.4, ao início do processo iterativo as matrizes jacobianas de medidas  $\mathbf{H}_{AA}$  e  $\mathbf{H}_{RR}$  são computadas em condições de partida *flat*, ou seja, os módulos das tensões em todas as barras são inicializados como 1 *p.u.* e os ângulos de fase das tensões são inicializados como 0 *rad*. Tais simplificações resultam em matrizes jacobianas que independem das variáveis de estado do sistema, computadas apenas em função dos parâmetros dos elementos passivos presentes no sistema. Nessa Seção tais matrizes serão referidas como  $\mathbf{H}_{AA}^0$  e  $\mathbf{H}_{RR}^0$ .

Ao considerar sistemas que contém apenas elementos passivos, as matrizes ganho  $\mathbf{G}_{AA}$  e  $\mathbf{G}_{RR}$  são obtidas a partir de  $\mathbf{H}_{AA}^0$ ,  $\mathbf{H}_{RR}^0$ ,  $\mathbf{R}_A$  e  $\mathbf{R}_R$  conforme apresentado na Seção 3.1.4. Nessa condição, as matrizes ganho  $\mathbf{G}_{AA}$  e  $\mathbf{G}_{RR}$  são calculadas e

decompostas em fatores triangulares apenas uma vez ao início do processo iterativo, sendo mantidas constantes na solução dos sistemas de equações dos problemas ativo e reativo até que obtenha-se uma estimativa para as variáveis de estado do sistema.

Ao inserir as variáveis de controle dos TCSCs como novas variáveis de estado a obtenção de matrizes ganho aproximadas e independentes das variáveis de estado do problema torna-se inviável. Os valores das reatâncias dos controladores  $x^{TCSC}$  são atualizados a cada iteração, o que reflete em alterações em  $\mathbf{H}_{AA}$  e  $\mathbf{H}_{RR}$ , e, consequentemente, em  $\mathbf{G}_{AA}$  e  $\mathbf{G}_{RR}$ . Em suma, desde a primeira iteração até a obtenção de uma solução convergida, a presença de  $x^{TCSC}$  como variável de estado resulta em alterações significativas em  $\mathbf{G}_{AA}$  e  $\mathbf{G}_{RR}$  a cada iteração, inviabilizando a utilização de matrizes ganho completamente aproximadas e constantes ao longo do processo iterativo.

Em contrapartida, propõe-se que as matrizes Jacobianas de medidas do TCSC-SE sejam escritas como a soma de duas matrizes: uma computada em função dos parâmetros dos elementos passivos, em condição de partida *flat*, e outra em função dos parâmetros dos TCSCs. Essa característica é explorada a fim de aproximar o algoritmo proposto da formulação *EE-DR*, de forma que as matrizes Jacobianas de medidas  $\mathbf{H}_{AA}^0$  e  $\mathbf{H}_{RR}^0$  podem ser escritas como:

$$\mathbf{H}_{AA}^0 = \mathbf{H}_{AA}^{Rede0} + \mathbf{H}_{AA}^{TCSC} \quad (4.123)$$

$$\mathbf{H}_{RR}^0 = \mathbf{H}_{RR}^{Rede0} + \mathbf{H}_{RR}^{TCSC} \quad (4.124)$$

onde:

$$\mathbf{H}_{AA}^{Rede0} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{AA}^{Inj,Rede0} \\ \mathbf{H}_{AA}^{Flow,Rede0} \end{bmatrix} \quad (4.125)$$

$$\mathbf{H}_{AA}^{TCSC} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{AA}^{Inj,TCSC} \\ \mathbf{H}_{AA}^{Flow,TCSC} \end{bmatrix} \quad (4.126)$$

$$\mathbf{H}_{RR}^{Rede0} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{RR}^{Inj,Rede0} \\ \mathbf{H}_{RR}^{Flow,Rede0} \\ \mathbf{H}_{RR}^{Vmod} \end{bmatrix} \quad (4.127)$$

$$\mathbf{H}_{RR}^{TCSC} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{RR}^{Inj,TCSC} \\ \mathbf{H}_{RR}^{Flow,TCSC} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (4.128)$$

Ao início do processo iterativo em condição de partida *flat*, as matrizes  $\mathbf{H}_{AA}^{Inj,Rede0}$ ,  $\mathbf{H}_{AA}^{Flow,Rede0}$ ,  $\mathbf{H}_{RR}^{Inj,Rede0}$ ,  $\mathbf{H}_{RR}^{Flow,Rede0}$  e  $\mathbf{H}_{RR}^{Vmod}$  independem das variáveis de estado do problema. Assim, de acordo com a formulação *EE-DR* apresentado na Seção 3.1.4, as matrizes  $\mathbf{H}_{AA}^{Rede0}$  e  $\mathbf{H}_{RR}^{Rede0}$  são calculadas apenas uma vez no início do processo iterativo e mantidas constantes em até que se obtenha uma solução convergida.

Conforme a formulação do *TCSC-SE* disposta nas seções 4.2.3.2 e 4.2.3.3, as matrizes  $\mathbf{H}_{AA}^{TCSC}$  e  $\mathbf{H}_{RR}^{TCSC}$  são atualizadas a cada iteração em função dos valores mais recentes obtidos para as variáveis de estado estimadas. A fim de contornar os possíveis problemas de convergência resultantes da utilização de matrizes ganho completamente constantes ao longo de todo o processo iterativo, propõe-se que apenas as submatrizes Jacobianas referentes às medidas de fluxos de potências nos ramos controlados, assim como as submatrizes Jacobianas de injeções de potências nas barras terminais dos *TCSCs* sejam atualizadas a cada iteração. Com isso, apenas as matrizes  $\mathbf{H}_{AA}^{TCSC}$  e  $\mathbf{H}_{RR}^{TCSC}$  são recalculadas a cada iteração, o que reflete em atualizações em  $\mathbf{H}_{AA}^0$  e  $\mathbf{H}_{RR}^0$ . Nesse sentido, a cada iteração as matrizes ganho são calculadas por:

$$\mathbf{G}_{AA} = \mathbf{H}_{AA}^0{}^T \mathbf{R}_A^{-1} \mathbf{H}_{AA}^0 \quad (4.129)$$

$$\mathbf{G}_{RR} = \mathbf{H}_{RR}^0{}^T \mathbf{R}_A^{-1} \mathbf{H}_{RR}^0 \quad (4.130)$$

Para efeitos práticos, o número de controladores presentes na rede é pequeno, mesmo em sistemas de transmissão de grandes dimensões, portanto a atualização dos valores dos parâmetros de controle dos *TCSCs* resultará em alterações pontuais em  $\mathbf{H}_{AA}^0$  e  $\mathbf{H}_{RR}^0$ , e, como consequência, também em  $\mathbf{G}_{AA}$  e  $\mathbf{G}_{RR}$ . Dessa forma, de acordo com a formulação proposta, tais matrizes podem ser consideradas como “semi-constantes” uma vez que não são mantidas constantes ao longo do processo iterativo, mas sofrem alterações pontuais até a obtenção da solução convergida.

#### 4.2.3.6 Considerações acerca do processo iterativo e da inicialização das variáveis

Em conformidade com a formulação desenvolvida para o *TCSC-SE*, apresentada nas seções 4.2.3.1 - 4.2.3.5, algumas considerações são feitas com intuito de melhorar a característica de convergência do método proposto.

Conforme mencionado anteriormente, as variáveis de estado tradicionais do problema de estimação de estado são inicializadas em condição de partida *flat*, enquanto que as reatâncias equivalentes dos *TCSCs* são inicializadas com metade da reatância do ramo controlado  $k - m$ , conforme disposto na Seção 4.2.2. Além disso, ao longo do desenvolvimento do trabalho verificou-se empiricamente que as características de convergência do *TCSC-SE* melhoram ao desconsiderar a presença de controladores na primeira iteração. Tal melhora, atribuída à característica puramente reativa dos *TCSCs*, será discutida a seguir.

De acordo com as expressões (4.80) e (4.103), as injeções de potência ativa nas barras terminais de  $TCSC_{kn}$  são compostas por duas parcelas, uma influenciada pelos parâmetros dos elementos passivos conectados às barras  $k$  e  $n$ , e outra influenciada por  $x_{kn}^{TCSC}$ . Ainda, conforme as expressões (8.82) e (4.105), as parcelas das injeções de potência ativa em  $k$  e  $n$  diretamente influenciadas por  $x_{kn}^{TCSC}$  são calculadas em função do seno da abertura angular  $\theta_{kn}$ . Sob condições de partida plana na primeira iteração,  $P_k^{TCSC}$  e  $P_n^{TCSC}$  serão nulas, fazendo com que os resíduos associados às medidas de injeção de potência ativa  $P_k$  e  $P_n$  sejam elevados, contribuindo para a divergência do processo iterativo.

De acordo com a expressão (4.76), o fluxo de potência ativa no ramo controlado pelo *TCSC* é sensível a  $x_{kn}^{TCSC}$  e ao seno da abertura angular  $\theta_{kn}$ . Portanto, sob condições de partida plana durante a primeira iteração os desvios relacionados às medidas de fluxos de potência ativa nos ramos controlados assumem valores elevados, uma vez que o valor calculado para medida de fluxo  $P_{km} = P_{kn}^{TCSC}$  é nulo, o que também contribui para a divergência do processo iterativo.

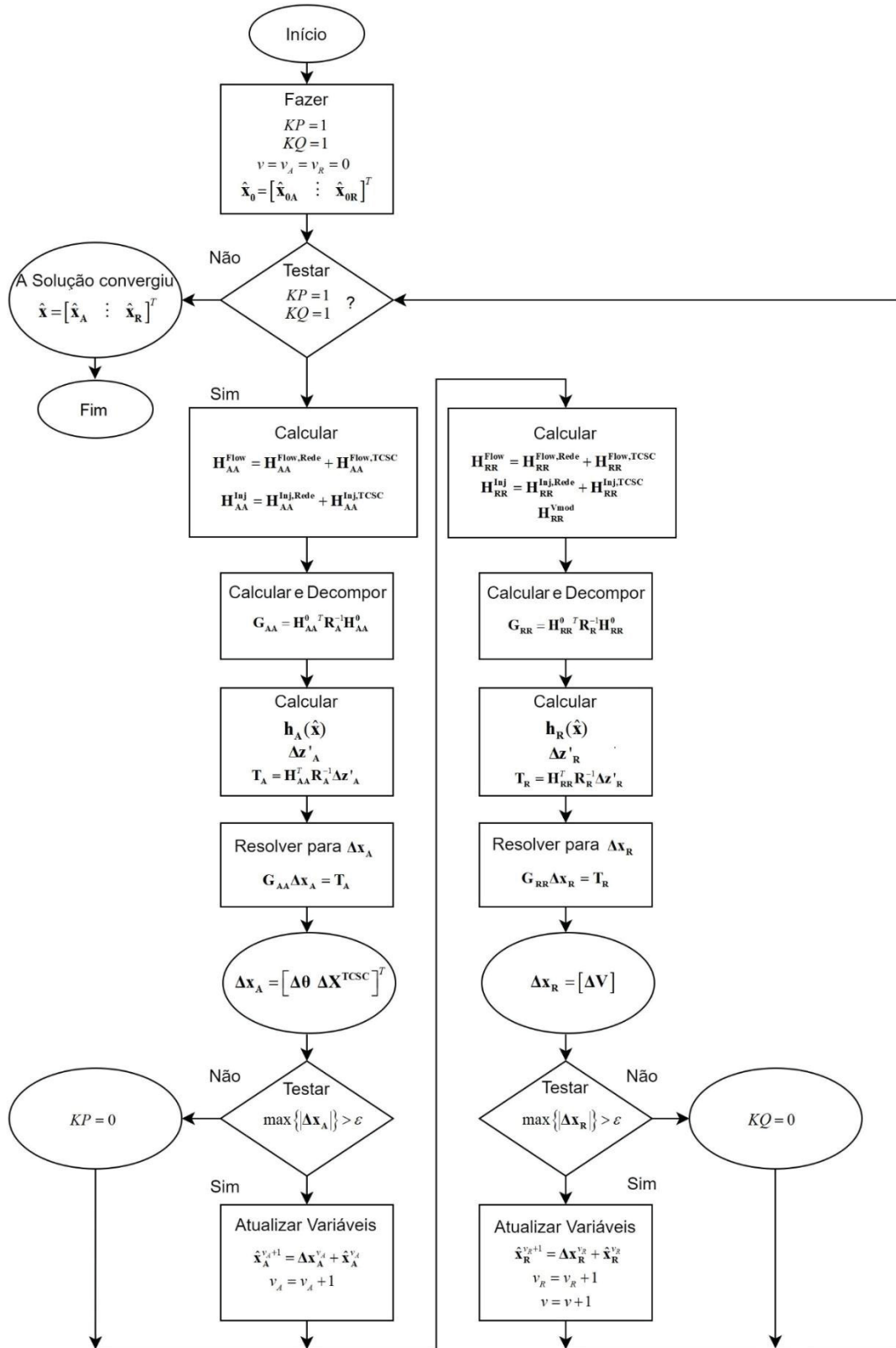
Esse problema é contornado ao desconsiderar a influência dos *TCSCs* durante a primeira iteração. Isso é feito ao eliminar as colunas referentes às derivadas parciais em relação às reatâncias equivalentes dos *TCSCs* em  $\mathbf{H}_{AA}$  e  $\mathbf{H}_{RR}$ . Assim, ao



fim da primeira iteração serão atualizados apenas os valores estimados para as variáveis de estado tradicionais contidas nos vetores  $\mathbf{V}$  e  $\boldsymbol{\theta}$ , preservando-se a ordem de grandeza dos desvios associados às medidas de injeções de potência ativa nas barras terminais dos controladores e de fluxos de potência ativa nos ramos controlados.

Ao início da segunda iteração as colunas referentes às derivadas parciais em relação às reatâncias equivalentes dos TCSCs são inseridas em  $\mathbf{H}_{AA}$  e  $\mathbf{H}_{RR}$ . Nesse momento, as medidas de injeção de potência ativa nas barras terminais dos controladores e as medidas de fluxo de potência ativa nos ramos controlados são calculadas utilizando os valores iniciais adotados em  $\mathbf{x}^{TCSC}$  e os valores de  $\mathbf{V}$  e  $\boldsymbol{\theta}$  obtidos na primeira iteração, novamente preservando a ordem de grandeza dos desvios associados à tais medidas e melhorando a característica de convergência do método. O fluxograma completo do método TCSC-SE é ilustrado na FIGURA 4.8.

FIGURA 4.8 - FLUXOGRAMA DO MÉTODO TCSC-SE



FONTE: O autor (2020).

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

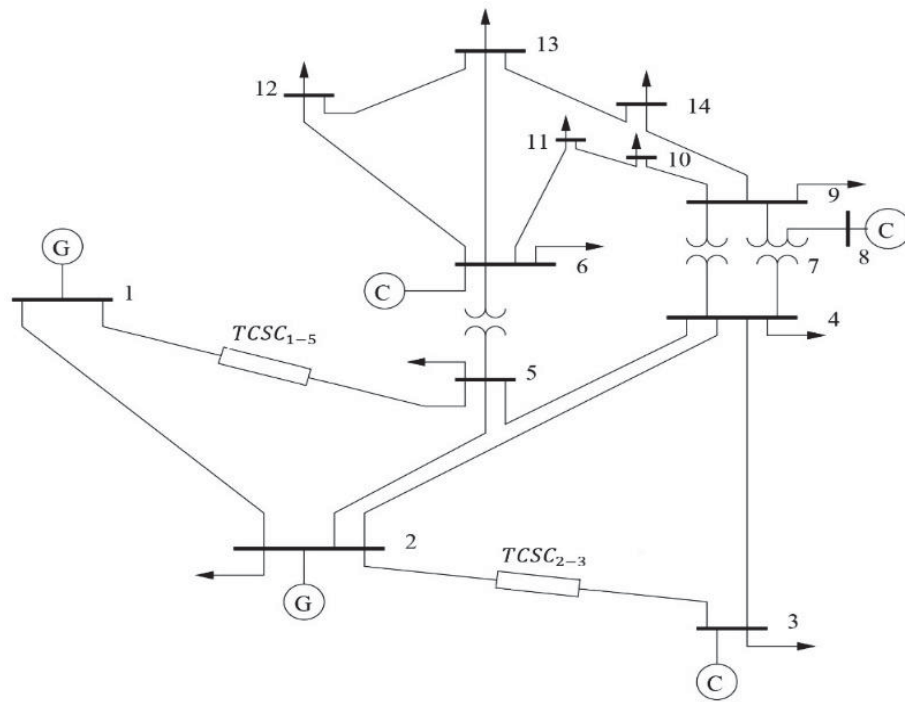
Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir das simulações e testes conduzidos para o *TCSC-LSE* e o *TCSC-SE*, em diferentes sistemas-teste, com o objetivo de demonstrar o desempenho e aplicabilidade das ferramentas propostas. As ferramentas apresentadas no presente trabalho de pesquisa foram implementadas no *software* MATLAB®.

Inicialmente é apresentada a análise dos resultados obtidos para o *TCSC-LSE*, publicados em (DE LIMA; LOURENÇO; TORTELLI, 2019). Ponderações sobre a aplicabilidade e limitações do método também são apresentadas. Em seguida são apresentados os resultados obtidos para o *TCSC-SE*, que envolve a abordagem não linear do problema, bem como considerações sobre o desempenho, aplicabilidade e limitações do método.

### 5.1 *TCSC-LSE*

A metodologia apresentada na Seção 4.1 é utilizada para estimar as condições operativas em regime permanente do sistema *IEEE* 14 barras com *TCSC*. Para tanto, considera-se que dois *TCSCs* são inseridos no sistema, a fim de controlar os fluxos de potência ativa que fluem nos ramos 1-5 e 2-3, conforme ilustrado na FIGURA 5.1. Esses ramos foram escolhidos por apresentarem fluxo de potência ativa próximo a 20% do limite teórico de transmissão de potência ativa, calculado pela relação  $1/X$ , para o caso base em que não há controladores *FACTS* no sistema.

FIGURA 5.1 - SISTEMA 14 BARRAS IEEE MODIFICADO COM TCSCS



FONTE: O autor (2019).

Os fluxos de potência ativa nos ramos 1-5 e 2-3 são especificados em valores superiores e inferiores ao caso base (em passos de  $\pm 0,1$  p.u.), gerando quatro estudos de caso distintos. Para todos os casos são utilizadas vinte medidas de fluxo de potência ativa e três medidas de injeção de potência ativa. A seguir são mostrados os valores dos fluxos de potência ativa especificados para os ramos 1-5 e 2-3 para os quatro casos de simulação:

- Caso 1:  $P_{1-5}^{esp} = 0,8260$  p.u. e  $P_{2-3}^{esp} = 0,8111$  p.u.;
- Caso 2:  $P_{1-5}^{esp} = 0,7260$  p.u. e  $P_{2-3}^{esp} = 0,7111$  p.u.;
- Caso 3:  $P_{1-5}^{esp} = 1,0260$  p.u. e  $P_{2-3}^{esp} = 1,0111$  p.u.;
- Caso 4:  $P_{1-5}^{esp} = 1,1260$  p.u. e  $P_{2-3}^{esp} = 1,1111$  p.u..

Seguindo a metodologia proposta, as reatâncias equivalentes dos TCSCs são consideradas como novas variáveis de estado para o problema de *EE* linearizado, sendo estimadas em conjunto com os ângulos das tensões nas barras.

Na TABELA 1 são apresentados os resultados obtidos para as medidas do caso base, onde não há TCSCs no sistema. São apresentados os valores

“verdadeiros” (*True*), simulados (*Meas*) e estimados (*Est*) das medidas, bem como os resíduos (*Res*) correspondentes. O resultado associado ao resíduo de maior magnitude é destacado em negrito e sublinhado, enquanto que o associado ao resíduo de menor magnitude é destacado em negrito simples. Na TABELA 2 são apresentados os resultados calculados e estimados das variáveis de estado do caso base. A melhor estimativa obtida nesse caso de simulação é destacada em negrito sublinhado, enquanto que a pior é destacada em negrito simples.

TABELA 1 - DADOS DE MEDIÇÃO PARA O SISTEMA IEEE 14 BARRAS: CASO BASE

Tipo	De	Para	Barra	True	Meas	Est	Res
Fluxo (pu)	1	2		1,9249	1,9247	1,9249	2,62E-04
	5	1		-0,9260	-0,9255	-0,9256	-1,73E-04
	3	2		-0,9111	-0,9102	-0,9111	4,17E-05
	2	4		0,7189	0,7200	0,7187	-3,91E-04
	2	5		0,5327	0,5319	0,5323	-6,86E-04
	3	4		-0,3135	-0,3134	-0,3137	4,64E-04
	4	5		-0,8105	-0,8115	-0,8116	3,21E-05
	7	4		-0,3778	-0,3787	-0,3788	1,47E-04
	4	9		0,2168	0,2168	0,2172	7,61E-04
	6	5		-0,5495	-0,5482	-0,5500	1,71E-04
	6	11		0,0814	0,0807	0,0814	-2,05E-04
	6	12		0,0987	0,0991	0,0989	7,04E-04
	13	6		-0,2237	-0,2239	-0,2243	3,12E-04
	7	8		<b><u>0,0000</u></b>	<b><u>0,0010</u></b>	<b><u>0,0009</u></b>	<b><u>6,52E-16</u></b>
	9	7		-0,3778	-0,3787	-0,3782	7,73E-05
	10	9		-0,0811	-0,0811	-0,0801	-8,70E-05
	9	14		0,1299	0,1304	0,1306	-9,81E-05
	10	11		-0,0359	-0,0349	-0,0363	1,98E-04
	13	12		-0,0194	-0,0181	-0,0197	-5,49E-04
	14	13		<b><u>-0,0638</u></b>	<b><u>-0,0637</u></b>	<b><u>-0,0646</u></b>	<b><u>-1,26E-04</u></b>
Injeção (pu)			1	2,8509	2,8490	2,8505	2,61E-05
			2	0,2379	0,2372	0,2372	2,89E-04
			3	-1,2246	-1,2254	-1,2248	-1,43E-04

FONTE: O autor (2019).

TABELA 2 - VALORES CALCULADOS E ESTIMADOS PARA O SISTEMA IEEE 14 BARRAS: CASO BASE

Tipo	Barra	Calc	Est	Barra	Calc	Est
Ângulo (Graus)	1	0,0000	0,0000	8	-18,3153	-18,3351
	2	<b><u>-6,5258</u></b>	<b><u>-6,5258</u></b>	9	-20,6965	-20,7093
	3	-16,8606	-16,8605	10	-21,0893	-21,0973
	4	-13,7888	-13,7868	11	-20,6946	-20,6983
	5	-11,8334	-11,8286	12	-21,2146	-21,2191
	6	-19,7673	-19,7701	13	-21,4373	-21,4444
	7	-18,3153	-18,3257	14	<b><u>-22,7091</u></b>	<b><u>-22,7323</u></b>

FONTE: O autor (2019).

Os resultados obtidos para as medidas e variáveis de estado dos Casos 1 e 2, em que os TCSCs inseridos no sistema operam na região reativa ( $x^{TCSC} > 0$ ) a fim

de limitar o fluxo de potência ativa nos ramos controlados são apresentados na TABELA 3, TABELA 4, TABELA 5 e TABELA 6.

Na TABELA 3 e na TABELA 5, os resultados associados aos resíduos de maiores magnitudes são destacados em **negrito sublinhado**, enquanto que os associados aos resíduos de menores magnitudes são destacados em **negrito simples**. Na TABELA 4 e na TABELA 6 as melhores estimativas obtidas são destacadas em **negrito sublinhado**, enquanto que as piores são destacadas em **negrito simples**.

Conforme proposto na Seção 4.1, as medidas de fluxo de potência nos ramos controlados pelos TCSCs são manipuladas a fim de inserir pseudo-medidas nulas que relacionam o fluxo especificado nos ramos à reatância variável dos controladores. Os baixos valores associados aos resíduos de estimação indicam que a metodologia proposta é capaz de fornecer uma estimativa precisa das variáveis de estado do sistema, ainda que existam erros associados às medidas inseridas no algoritmo.

TABELA 3 - DADOS DE MEDIÇÃO PARA O SISTEMA IEEE 14 BARRAS: CASO 1

Tipo	De	Para	Barra	Calc.	Meas.	Est.	Res.
Fluxo (pu)	1	2		2,0249	2,0253	2,0245	8,19E-04
	5	1		-0,8260	-	-	-
	3	2		-0,8111	-	-	-
	2	4		0,8183	0,8186	0,8181	5,16E-04
	2	5		0,6334	0,6325	0,6331	-5,74E-04
	3	4		-0,4135	-0,4135	-0,4132	-2,51E-04
	4	5		-0,8111	-0,8112	-0,8113	5,12E-05
	7	4		-0,3778	-0,3772	-0,3773	5,66E-05
	4	9		<b><u>0,2168</u></b>	<b><u>0,2178</u></b>	<b><u>0,2166</u></b>	<b><u>1,18E-03</u></b>
	6	5		-0,5495	-0,5485	-0,5490	4,74E-04
	6	11		0,0814	0,0806	0,0809	-3,14E-04
	6	12		0,0987	0,0988	0,0990	-1,78E-04
	13	6		-0,2237	-0,2248	-0,2248	-5,50E-05
	7	8		<b><u>0,0000</u></b>	<b><u>-0,0010</u></b>	<b><u>-0,0010</u></b>	<b><u>-1,08E-16</u></b>
	9	7		-0,3778	-0,3778	-0,3778	2,98E-05
	10	9		-0,0811	-0,0797	-0,0796	-1,33E-04
	9	14		0,1299	0,1292	0,1291	7,44E-05
	10	11		-0,0359	-0,0356	-0,0359	3,03E-04
	13	12		-0,0194	-0,0197	-0,0198	1,39E-04
	14	13		-0,0638	-0,0628	-0,0629	9,57E-05
Injeção (pu)			1	2,0249	2,0237	2,0245	-7,75E-04
			2	-0,5732	-0,5732	-0,5732	3,65E-05
			3	-0,4135	-0,4130	-0,4132	2,51E-04
Medida	5	1		-	0	5,5511E-17	-5,5511E-17
Nula	3	2		-	0	5,5511E-17	-5,5511E-17

FONTE: O autor (2019).

TABELA 4 - VALORES CALCULADOS E ESTIMADOS PARA O SISTEMA IEEE 14 BARRAS: CASO 1

Tipo	Barra	De	Para	Calc.	Est.	Barra	Calc.	Est.
Ângulo (Graus)	1			0,0000	0,0000	8	-19,6580	-19,6384
	2			-6,8649	-6,8633	9	-22,0390	-22,0298
	3			-19,1835	-19,1776	10	-22,4317	-22,4152
	4			-15,1318	-15,1281	11	-22,0368	-22,0206
	5			-13,1749	-13,1708	12	-22,5566	-22,5494
	6			-21,1093	-21,0985	13	-22,7793	-22,7761
	7			-19,6580	-19,6485	14	<b>-24,0515</b>	<b>-24,0302</b>
X TCSC (pu)	1	5		<b>0,0553</b>	<b>0,0553</b>			
	2	3		0,0671	0,0670			

FONTE: O autor (2019).

TABELA 5 - DADOS DE MEDIÇÃO PARA O SISTEMA IEEE 14 BARRAS: CASO 2

Tipo	De	Para	Barra	Calc.	Meas.	Est.	Res.
Fluxo (pu)	1	2		2,1249	2,1253	2,1245	8,30E-04
	5	1		-0,7260	-	-	-
	3	2		-0,7111	-	-	-
	2	4		0,9177	0,9180	0,9175	5,22E-04
	2	5		0,7340	0,7332	0,7337	-5,80E-04
	3	4		-0,5135	-0,5135	-0,5132	-2,48E-04
	4	5		-0,8117	-0,8118	-0,8119	5,16E-05
	7	4		-0,3777	-0,3772	-0,3773	5,66E-05
	4	9		<b>0,2167</b>	<b>0,2177</b>	<b>0,2166</b>	<b>1,18E-03</b>
	6	5		-0,5495	-0,5486	-0,5491	4,74E-04
	6	11		0,0814	0,0806	0,0809	-3,14E-04
	6	12		0,0988	0,0988	0,0990	-1,78E-04
	13	6		-0,2238	-0,2248	-0,2248	-5,49E-05
	7	8		<b>0,0000</b>	<b>-0,0010</b>	<b>-0,0010</b>	<b>-1,54E-17</b>
	9	7		-0,3777	-0,3777	-0,3778	2,98E-05
	10	9		-0,0811	-0,0797	-0,0796	-1,33E-04
	9	14		0,1299	0,1292	0,1291	7,44E-05
	10	11		-0,0359	-0,0356	-0,0359	3,03E-04
	13	12		-0,0195	-0,0197	-0,0198	1,39E-04
	14	13		-0,0638	-0,0628	-0,0629	9,57E-05
Injeção (pu)			1	2,1249	2,1237	2,1245	-7,86E-04
			2	-0,4732	-0,4732	-0,4732	3,64E-05
			3	-0,5135	-0,5130	-0,5132	2,48E-04
Medida	5	1		-	0	5,55E-17	-5,55E-17
Nula	3	2		-	0	5,55E-17	-5,55E-17

FONTE: O autor (2019).

TABELA 6 - VALORES CALCULADOS E ESTIMADOS PARA O SISTEMA IEEE 14 BARRAS: CASO 2

Tipo	Barra	De	Para	Calc.	Est.	Barra	Calc.	Est.
Ângulo (Deg)	1			0,0000	0,0000	8	-21,0007	-20,9810
	2			-7,2039	-7,2023	9	-23,3816	-23,3723
	3			-21,5064	-21,5005	10	-23,7742	-23,7576
	4			-16,4747	-16,4710	11	-23,3790	-23,3628
	5			-14,5164	-14,5122	12	-23,8987	-23,8914
	6			-22,4513	-22,4404	13	-24,1214	-24,1181
	7			-21,0007	-20,9911	14	<b>-25,3938</b>	<b>-25,3725</b>
X TCSC (pu)	1	5		0,1259	0,1258			
	2	3		<b>0,1531</b>	<b>0,1530</b>			

FONTE: O autor (2019).

A análise dos resultados apresentados na TABELA 4 e na TABELA 6 permite verificar que a atuação do TCSC na região indutiva aumenta eletricamente o comprimento do ramo controlado a fim de limitar o fluxo de potência ativa e redistribuir os fluxos de potência no sistema como um todo.

Os resultados obtidos para variáveis de estado dos Casos 3 e 4 são apresentados na TABELA 7 e TABELA 8, respectivamente. As melhores estimativas obtidas nesses casos de simulação são destacadas em negrito sublinhado, enquanto que as piores são destacadas em negrito simples. Nesses casos, os TCSCs inseridos no sistema operam na região capacitiva ( $x^{TCSC} < 0$ ) a fim de reduzir eletricamente o comprimento do ramo compensado, permitindo um aumento na capacidade de transmissão de potência ativa.

TABELA 7 - VALORES CALCULADOS E ESTIMADOS PARA O SISTEMA IEEE 14  
BARRAS: CASO 3

Tipo	Barra	De	Para	Calc.	Est.	Barra	Calc.	Est.
Ângulo (Graus)	1			0,0000	0,0000	8	-16,9726	-16,9531
	2			-6,1868	-6,1853	9	-19,3540	-19,3448
	3			-14,5378	-14,5320	10	-19,7468	-19,7304
	4			-12,4459	-12,4423	11	-19,3523	-19,3363
	5			-10,4919	-10,4879	12	-19,8725	-19,8654
	6			-18,4253	-18,4146	13	-20,0952	-20,0920
	7			-16,9726	-16,9632	14	<b>-21,3668</b>	<b>-21,3456</b>
X TCSC		1	5	<b>-0,0446</b>	<b>-0,0446</b>			
(pu)		2	3	-0,0538	-0,0539			

FONTE: O autor (2019).

TABELA 8 - VALORES CALCULADOS E ESTIMADOS PARA O SISTEMA IEEE 14  
BARRAS: CASO 4

Tipo	Barra	De	Para	Calc.	Est.	Barra	Calc.	Est.
Ângulo (Graus)	1			0,0000	0,0000	8	-15,6299	-15,6105
	2			-5,8478	-5,8463	9	-18,0114	-18,0023
	3			-12,2149	-12,2091	10	-18,4044	-18,3880
	4			-11,1030	-11,0994	11	-18,0101	-17,9941
	5			-9,1504	-9,1464	12	-18,5305	-18,5235
	6			-17,0833	-17,0726	13	-18,7531	-18,7500
	7			-15,6299	-15,6206	14	<b>-20,0244</b>	<b>-20,0033</b>
X TCSC		1	5	-0,0812	-0,0813			
(pu)		2	3	<b>-0,0980</b>	<b>-0,0980</b>			

FONTE: O autor (2019).

Os resultados apresentados na TABELA 7 e TABELA 8 permitem verificar que apesar das variações impostas às condições operativas do sistema, a estimação de estados é realizada com grande precisão. A metodologia proposta não impõe



limitações quanto ao número de *TCSCs* presentes no sistema, desde que o número de medidas fornecidas ao algoritmo garanta a observabilidade do sistema. Valores estimados para as medidas resultam em valores dos resíduos igualmente baixos, como nos casos apresentados, ratificando a eficácia da ferramenta proposta.

## 5.2 *TCSC-SE*

Na presente Seção são apresentados os resultados obtidos para o *TCSC-SE*, implementado de acordo com a formulação descrita na Seção 4.2. Os resultados são gerados para três sistemas-teste de transmissão com portes e características distintas. Inicialmente são apresentados os sistemas-teste utilizados e as premissas que orientam a definição dos planos de medição e cenários de simulação para cada sistema. Em seguida os resultados obtidos para cada sistema-teste são apresentados e analisados.

### 5.2.1 Sistemas-teste

Com intuito de avaliar a metodologia desenvolvida para a abordagem não linear do problema de *EE*, as simulações e testes são conduzidos para três sistemas-teste amplamente conhecidos no meio acadêmico, amplamente utilizados em estudos de sistemas de energia. Tratam-se dos sistemas-teste de transmissão de 14, 30 e 118 barras do *IEEE*, cujos dados foram obtidos do banco de dados do *software* MATPOWER® (ZIMMERMAN; MURILLO-SANCHEZ, 2019; ZIMMERMAN; MURILLO-SÁNCHEZ; THOMAS, 2011). Os dados dos sistemas-teste utilizados também estão disponíveis em (CHRISTIE, 1999).

O sistema-teste de 14 barras é o mesmo utilizado nos testes realizados para o *TCSC-LSE* apresentado na Seção 4.1. Trata-se da representação de uma porção do sistema elétrico norte-americano em fevereiro de 1962, ilustrado na FIGURA 5.1. O sistema-teste de 30 barras, ilustrado na FIGURA 5.2, e o sistema-teste de 118 barras, ilustrado na FIGURA 5.3, representam a porção centro-oeste do sistema elétrico norte-americano em dezembro de 1961 e dezembro de 1962, respectivamente.



Os testes do *TCSC-SE* são conduzidos nos três sistemas-teste apresentados, cujas particularidades são úteis para verificar se o método proposto é aplicável a sistemas com portes e características diversas. As mesmas premissas são adotadas na definição dos planos de medição e cenários de simulação para cada sistema sob análise, tais premissas são apresentadas a seguir.

### 5.2.2 Planos de medição e cenários de simulação

Conforme apresentado na Seção 3.1.1, o modelo de medição do estimador de estado generalizado leva em conta a obtenção de medidas de fluxos e injeções de potência ativa e reativa, e de magnitudes de tensão nas barras. Nesse sentido, devem ser definidos os planos de medição para cada um dos sistemas-teste escolhidos, que definem as barras e ramos monitorados do sistema. Para efeitos práticos, o plano de medição reflete o posicionamento e a natureza dos equipamentos de medição e monitoramento presentes em um sistema real.

Para tanto, em todos os sistemas-teste utilizados considera-se a existência de medidas de magnitude de tensão e injeções de potência ativa e reativa em todas as barras de geração, bem como nas barras de carga com maiores quantidades de potência demandada. Além disso, considera-se a existência de pelo menos uma medida de fluxo de potência ativa e/ou reativa em cada um dos ramos. Tais premissas são adotadas com intuito de melhor representar cenários que ocorrem nos sistemas de transmissão atuais, que dispõe de sistemas de monitoramento extensos que provêm bons níveis de redundância ao conjunto de medidas.

Uma vez definidas as premissas para os planos de medição, são então definidas as premissas para os cenários de simulação. Conforme disposto na Seção 3.2.1, a principal característica do *TCSC* diz respeito à sua capacidade de regular a capacidade de transmissão de potência ativa no ramo em que é inserido, fornecendo compensação série reativa variável. Nesse sentido, pressupõe-se que tais dispositivos sejam instalados em “ramos críticos” do sistema, nos quais deseja-se regular a capacidade de transmissão de potência ativa.

No presente trabalho de pesquisa, são considerados críticos os ramos em que os fluxos de potência ativa em condições normais de operação mais se aproximam do limite teórico de transmissão de potência ativa, dado pelo inverso da reatância do ramo

em p.u. Dessa forma, em todos os sistemas-teste escolhidos são identificados tais ramos críticos, onde serão adicionados os *TCSCs*. Para os sistemas-teste de 14 e 30 barras que possuem dimensões reduzidas, são identificados dois ramos críticos, já para o sistema de 118 barras, são identificados três.

A partir da definição dos ramos críticos em cada um dos sistemas-teste, são então definidos os cenários de simulação que visam demonstrar a capacidade do método proposto em estimar corretamente as variáveis de estado de um sistema de potência para os diferentes modos de operação do *TCSC*. Tais cenários são obtidos a partir de variações dos resultados obtidos em um caso base, provenientes da solução do problema de fluxo de carga sob condições normais de operação, ou seja, considerando os patamares de geração e carregamento oriundos dos dados nominais de barra e linha de cada um dos sistemas-teste sob estudo.

Os quatro cenários de simulação são obtidos ao especificar fluxos de potência ativa nos ramos críticos de cada um dos sistemas-teste em valores inferiores e superiores aos do caso base, da seguinte forma:

- Cenário Indutivo I

$$P_{Crit,14,30}^{esp} = 0,95.P_{Crit,14,30}^{Base}$$

$$P_{Crit,118}^{esp} = 0,9.P_{Crit,118}^{Base}$$

- Cenário Indutivo II

$$P_{Crit,14,30}^{esp} = 0,9.P_{Crit,14,30}^{Base}$$

$$P_{Crit,118}^{esp} = 0,8.P_{Crit,118}^{Base}$$

- Cenário Capacitivo I

$$P_{Crit,14,30}^{esp} = 1,06.P_{Crit,14,30}^{Base}$$

$$P_{Crit,118}^{esp} = 1,1.P_{Crit,118}^{Base}$$

- Cenário Capacitivo II

$$P_{Crit,14,30}^{esp} = 1,1.P_{Crit,14,30}^{Base}$$

$$P_{Crit,118}^{esp} = 1,2.P_{Crit,118}^{Base}$$

onde:

$P_{Crit,14,30}^{esp}$  são os fluxos de potência ativa especificados para os ramos críticos dos sistemas-teste de 14 e 30 barras, respectivamente;

$P_{Crit,14,30}^{Base}$  são os fluxos de potência ativa obtidos nos casos base dos sistemas-teste de 14 e 30 barras, respectivamente;

$P_{Crit,118}^{esp}$  são os fluxos de potência ativa especificados para os ramos críticos do sistema-teste de 118 barras;

$P_{Crit,118}^{Base}$  são os fluxos de potência ativa obtidos no caso base do sistema-teste de 118 barras.

Conforme indicado pelo nome atribuído a cada um dos cenários de simulação, ao operar com um fluxo de potência ativa inferior àquele calculado para o caso base, espera-se que as reatâncias equivalentes dos TCSCs assumam característica indutiva, elevando o comprimento elétrico dos ramos de forma a limitar os fluxos de potência ativa nos mesmos. O oposto ocorre nos casos capacitivos, onde, ao especificar fluxos de potência ativa superiores aos dos calculados para o caso base, espera-se que as reatâncias equivalentes dos controladores assumam característica capacitiva, reduzindo o comprimento elétrico dos ramos, permitindo uma maior capacidade de transmissão de potência ativa. Em função do porte de cada sistema são utilizados multiplicadores distintos para os fluxos de potência especificado nos ramos controlados. Isso é feito para verificar a aplicabilidade do método proposto em condições mais extremas no sistema de maior porte, com maior excursão em torno dos fluxos calculados no caso base.

A próxima etapa, após a definição das premissas para os planos de medição e dos diferentes cenários de simulação para cada um dos sistemas-teste sob estudo, diz respeito à condução dos testes propriamente ditos. Em todas as simulações apresentadas nas seções a seguir, adotou-se a tolerância de  $\delta = 10^{-12}$  no algoritmo do gerador de grandezas medidas (*FCDR* para sistemas com *FACTS*) e tolerância de  $\delta = 10^{-4}$  no *TCSC-SE*.

### 5.2.3 Sistema *IEEE* 14 Barras

Inicialmente, para que sejam definidos os ramos críticos, calcula-se o fluxo de carga do caso base do sistema. Os resultados, obtidos com o algoritmo *FCDR* para sistemas com *FACTS*, apresentado na Seção 4.2.2, são dispostos na TABELA 9.

TABELA 9 - RESULTADOS DO FLUXO DE CARGA DO CASO BASE SISTEMA IEEE 14 BARRAS

Barra	V [p.u.]	$\theta$ [rad]
1	1.06000	0
2	1.04500	-0.11693
3	1.01000	-0.29815
4	1.00492	-0.23819
5	1.00843	-0.20381
6	1.07000	-0.33465
7	1.04104	-0.30719
8	1.09000	-0.30719
9	1.01954	-0.34376
10	1.01849	-0.34866
11	1.03923	-0.34431
12	1.04811	-0.35411
13	1.03946	-0.35497
14	1.00403	-0.37257

FONTE: O autor (2020).

A partir dos valores das variáveis de estado calculadas para o caso base do sistema *IEEE* 14 barras, calcula-se os fluxos de potência ativa nos ramos do sistema. Os resultados são comparados aos limites teóricos de transmissão de potência, e os ramos com maior percentual relativo ao limite teórico de transmissão são considerados como ramos críticos, onde serão inseridos os *TCSCs*. Para tanto, os limites teóricos de transmissão de potência ativa de cada ramo, os respectivos fluxos de potência ativa calculados no caso base e percentuais em relação ao limite teórico são apresentados na TABELA 10.

TABELA 10 - DEFINIÇÃO DOS RAMOS CRÍTICOS DO SISTEMA *IEEE* 14 BARRAS

# ramo	De [Barra]	Para [Barra]	Reatância [p.u.]	Limite Teórico Fluxo [p.u.]	Fluxo Base [p.u.]	% Limite teórico
1	1	2	0.05917	16.90046	2.08975	12.37%
2	1	5	0.22304	4.483501	0.99506	22.19%
3	2	3	0.19797	5.05127	0.97073	19.22%
4	2	4	0.17632	5.671506	0.73344	12.93%
5	2	5	0.17388	5.751093	0.54672	9.51%
6	3	4	0.17103	5.846927	-0.29449	5.04%
7	4	5	0.04211	23.74733	-0.77148	3.25%
8	4	7	0.20912	4.781943	0.33735	7.05%
9	4	9	0.55618	1.797979	0.18810	10.46%
10	5	6	0.25202	3.967939	0.52057	13.12%
11	6	11	0.1989	5.027652	0.10844	2.16%
12	6	12	0.25581	3.909151	0.10537	2.70%
13	6	13	0.13027	7.676364	0.23990	3.13%
14	7	8	0.17615	5.67698	0.00000	0.00%
15	7	9	0.11001	9.090083	0.35270	3.88%
16	9	10	0.0845	11.83432	0.05706	0.48%
17	9	14	0.27038	3.698498	0.11246	3.04%

18	10	11	0.19207	5.206435	-0.06004	1.15%
19	12	13	0.19988	5.003002	0.02469	0.49%
20	13	14	0.34802	2.873398	0.08459	2.94%

FONTE: O autor (2020).

De acordo com os dados apresentados na TABELA 10, verifica-se que os fluxos de potência ativa nos ramos 2 ( $P_{1-5}$ ) e 3 ( $P_{2-3}$ ) correspondem, respectivamente, a 22,19% e 19,22% do limite teórico de capacidade de transmissão de potência ativa em cada ramo. São esses os ramos críticos definidos para o sistema *IEEE* 14 barras, onde serão inseridos os *TCSCs* para os testes do *TCSC-SE*. O plano de medição e os cenários de simulação adotados para o sistema *IEEE* 14 Barras, obtidos de acordo com as premissas apresentadas na Seção 5.2.2, estão dispostos na TABELA 11 e TABELA 12, respectivamente.

TABELA 11 - PLANO DE MEDIÇÃO DEFINIDO PARA O SISTEMA *IEEE* 14 BARRAS

$P_{flow}$ e $Q_{flow}$ [p.u.]			$P_{inj}$ , $Q_{inj}$ e $V_{mag}$ [p.u.]	
# Medida	De [Barra]	Para [Barra]	# Medida	Barra
1	1	2	1	1
2	1	5	2	2
3	5	1	3	3
4	2	3		
5	3	2		
6	4	2		
7	5	2		
8	3	4		
9	4	5		
10	7	4		
11	4	9		
12	6	5		
13	6	11		
14	6	12		
15	13	6		
16	7	8		
17	9	7		
18	10	9		
19	9	14		
20	10	11		
21	13	12		
22	14	13		

FONTE: O autor (2020).

O plano de medição definido para o sistema *IEEE* 14 barras é composto por quarenta e quatro medidas de fluxo de potência (vinte e duas medidas ativas e vinte e duas medidas reativas), seis medidas de injeção de potência (três medidas ativas e três medidas reativas) e três medidas de magnitude de tensão, totalizando um

conjunto de cinquenta e três medidas. O conjunto de medidas resultante fornece boa redundância, garantindo a observabilidade do sistema.

TABELA 12 - CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO DEFINIDOS PARA O SISTEMA *IEEE* 14 BARRAS

$P_{Crit}^{esp}$ por cenário de simulação						
# TCSC	De [Barra]	Para [Barra]	Indutivo 1	Indutivo 2	Capacitivo 1	Capacitivo 2
1	1	5	0.9453	0.8956	1.0548	1.0946
2	2	3	0.9222	0.8737	1.0290	1.0678

FONTE: O autor (2020).

Com os valores calculados para as variáveis de estado do caso base, com suporte do plano de medição e das respectivas funções de medição, calcula-se o vetor perfeito de medidas  $z_0$ . Os valores calculados para os elementos dos sub-vetores que compõe  $z_0$  são apresentados na TABELA 13.

TABELA 13 - VETORES DE MEDIDAS PERFEITAS DO CASO BASE SISTEMA *IEEE* 14 BARRAS

$z_0$							
De [Barra]	Para [Barra]	$P_{flow}$ [p.u.]	$Q_{flow}$ [p.u.]	Barra	$P_{inj}$ [p.u.]	$Q_{inj}$ [p.u.]	$V_{mag}$ [p.u.]
1	2	2.08975	-0.31757	1	3.08481	-0.24195	1.06000
1	5	0.99506	0.07561	2	0.23790	0.57682	1.04500
5	1	-0.94693	0.07039	3	-1.22460	0.25668	1.01000
2	3	0.97073	0.01772				
3	2	-0.93011	0.10717				
4	2	-0.70473	0.03040				
5	2	-0.53092	-0.03295				
3	4	-0.29449	0.14951				
4	5	-0.77148	0.17513				
7	4	-0.33735	0.07599				
4	9	0.18810	-0.07020				
6	5	-0.52057	-0.01016				
6	11	0.10844	0.11399				
6	12	0.10537	0.04175				
13	6	-0.23559	-0.12226				
7	8	0.00000	-0.28935				
9	7	-0.35270	-0.19281				
10	9	-0.05696	0.00891				
9	14	0.11246	0.00720				
10	11	-0.06004	-0.08431				
13	12	-0.02450	-0.01791				
14	13	-0.08279	-0.06111				

FONTE: O autor (2020).

Adicionando-se os erros aleatórios com distribuição normal Gaussiana e média zero a cada medida, conforme a metodologia apresentada na Seção 3.1.2.2,



obtêm-se os vetores de medidas que alimentam o estimador de estado. Os valores obtidos para as medidas são dispostos na TABELA 14.

TABELA 14 - VETORES DE MEDIDAS DO CASO BASE SISTEMA *IEEE* 14 BARRAS

<b>z</b>							
<b>De</b> <b>[Barra]</b>	<b>Para</b> <b>[Barra]</b>	<b>P<sub>flow</sub></b> <b>[p.u.]</b>	<b>Q<sub>flow</sub></b> <b>[p.u.]</b>	<b>Barra</b>	<b>P<sub>inj</sub></b> <b>[p.u.]</b>	<b>Q<sub>inj</sub></b> <b>[p.u.]</b>	<b>V<sub>mag</sub></b> <b>[p.u.]</b>
1	2	2.08973	-0.31758	1	3.08497	-0.24213	1.05990
1	5	0.99515	0.07557	2	0.23791	0.57679	1.04512
5	1	-0.94699	0.07042	3	-1.22456	0.25658	1.01003
2	3	0.97069	0.01772				
3	2	-0.93012	0.10711				
4	2	-0.70477	0.03037				
5	2	-0.53101	-0.03287				
3	4	-0.29454	0.14964				
4	5	-0.77147	0.17518				
7	4	-0.33752	0.07607				
4	9	0.18812	-0.07022				
6	5	-0.52058	-0.01018				
6	11	0.10842	0.11396				
6	12	0.10522	0.04180				
13	6	-0.23557	-0.12229				
7	8	0.00003	-0.28938				
9	7	-0.35265	-0.19291				
10	9	-0.05699	0.00889				
9	14	0.11233	0.00726				
10	11	-0.06008	-0.08426				
13	12	-0.02441	-0.01789				
14	13	-0.08288	-0.06106				

FONTE: O autor (2020).

A partir do conjunto de medidas da TABELA 14, o *TCSC-SE* calcula uma estimativa para as variáveis de estado do sistema. O caso base não considera a presença de controladores, assim, nesse momento são estimados apenas as magnitudes e ângulos das tensões em todas as barras do sistema. Para o caso base o estimador convergiu em quatorze meias-iterações ativas e treze meias-iterações reativas, e os resultados obtidos são apresentados na TABELA 15. É possível comparar numericamente os valores calculados pelo gerador de grandezas medidas, via algoritmo *FCDR*, e as variáveis de estado estimadas pelo *TCSC-SE*. As melhores estimativas obtidas são destacadas em **negrito sublinhado**, enquanto que as mais distantes dos valores calculados são destacadas em **negrito simples**.

TABELA 15 – VARIÁVEIS DE RESTADO CALCULADAS E ESTIMADAS NO CASO BASE DO SISTEMA IEEE 14 BARRAS

Barra	V [p.u.]	$\hat{V}$ [p.u.]	$\theta$ [rad]	$\hat{\theta}$ [rad]
1	1.06000	1.05997	0.00000	0.00000
2	1.04500	1.04497	-0.11693	-0.11694
3	1.01000	1.00997	-0.29815	-0.29817
4	1.00492	1.00490	-0.23819	-0.23821
5	1.00843	1.00840	-0.20381	-0.20384
6	1.07000	1.06997	-0.33465	-0.33468
7	1.04104	1.04103	-0.30719	-0.30725
8	<b>1.09000</b>	<b>1.09000</b>	<b>-0.30719</b>	<b>-0.30726</b>
9	1.01954	1.01952	-0.34376	-0.34381
10	1.01849	1.01847	-0.34866	-0.34872
11	1.03923	1.03921	-0.34431	-0.34434
12	1.04811	1.04812	-0.35411	-0.35416
13	<b>1.03946</b>	<b>1.03942</b>	<b>-0.35497</b>	<b>-0.35497</b>
14	1.00403	1.00400	-0.37257	-0.37260

FONTE: O autor (2020).

A análise dos resultados da TABELA 15 evidencia a flexibilidade do *TCSC-SE*, aplicável também a sistemas convencionais que não possuem *TCSCs*. Verifica-se uma grande aproximação entre os resultados estimados e calculados, o que demonstra a precisão do método.

Uma vez que o *TCSC-SE* se mostra aplicável ao caso base, onde não existem controladores *FACTS*, deseja-se verificar a aplicabilidade do método para sistemas que contém o controlador *FACTS TCSC*. Inicialmente, nos casos Indutivo 1 e Indutivo 2, os controladores serão inseridos para fornecer compensação série indutiva aos ramos críticos definidos para o sistema. Nesses casos, os fluxos de potência ativa especificados nos ramos críticos são inferiores aos fluxos obtidos no caso base. Assim, espera-se que as reatâncias equivalentes dos controladores assumam característica indutiva, elevando o comprimento elétrico dos ramos controlados a fim de limitar a capacidade de transmissão de potência dos mesmos. Numericamente, isso pode ser verificado pelo sinal da reatância equivalente do controlador, positiva ao assumir característica indutiva.

Assim, são inseridos dois *TCSCs* no sistema, nos ramos críticos 1–5 e 2–3 definidos anteriormente. Especificando os fluxos de potência de acordo com o caso Indutivo 1 mostrado na TABELA 12,  $P_{1-5}^{esp} = 0,9453$  e  $P_{2-3}^{esp} = 0,9222$ , as variáveis de estado resultantes, calculadas via *FCDR* para sistemas com *TCSC*, são apresentadas na TABELA 16.

TABELA 16 - VARIÁVEIS DE ESTADO CALCULADAS PARA O SISTEMA *IEEE* 14 BARRAS NO CASO INDUTIVO 1

Barra	V [p.u.]	$\theta$ [rad]	De [Barra]	Para [Barra]	$x^{TCSC}$ [p.u.]
1	1.06000	0	1	15	0.02579
2	1.04500	-0.12007	2	16	0.03195
3	1.01000	-0.31927			
4	1.00441	-0.25015			
5	1.00790	-0.21568			
6	1.07000	-0.34665			
7	1.04081	-0.31918			
8	1.09000	-0.31918			
9	1.01931	-0.35574			
10	1.01830	-0.36066			
11	1.03914	-0.3563			
12	1.04810	-0.36611			
13	1.03943	-0.36697			
14	1.00388	-0.38457			
15	1.05802	-0.02174			
16	1.04413	-0.14708			

FONTE: O autor (2020).

De acordo com os resultados apresentados na TABELA 16, pode-se verificar que são calculadas as variáveis de estado de dezesseis barras. Isso ocorre pois, de acordo com a metodologia do *TCSC-SE*, cada controlador inserido no sistema é associado a uma barra adicional, também referida por barra de conexão. Uma vez que não se tratam de barras reais, as variáveis de estado associadas a tais barras não são fisicamente mensuradas, porém a modelagem adotada para o *TCSC* no presente trabalho de pesquisa permite que sejam calculadas, conforme apresentado na Seção 4.2.1. Em um primeiro momento são grandezas relevantes para fins de validação, servindo como parâmetros para a comparação numérica entre os resultados calculados e estimados.

A partir das variáveis de estado apresentadas na TABELA 1, do plano de medição e das funções de medição, as medidas que alimentam o estimador são novamente calculadas. Semelhantemente ao que foi feito para o caso base, inicialmente calcula-se o vetor de medidas perfeitas  $z_0$ , cujos elementos são acrescidos de erros aleatórios com distribuição normal Gaussiana e média zero, resultando no conjunto de medidas contido no vetor  $z$ , conforme apresentado na TABELA 17.

Espera-se que as medidas de fluxo de potência ativa simuladas para os ramos controlados, ou seja,  $P_{1-5}$  e  $P_{2-3}$ , sejam iguais aos fluxos especificados em cada ramo.

Nesse cenário, espera-se ainda que o *TCSC-SE* seja capaz de estimar as reatâncias equivalentes dos controladores para que seja mantida tal condição operativa.

TABELA 17 - VETORES DE MEDIDAS DO CASO INDUTIVO 1 DO SISTEMA *IEEE* 14 BARRAS

<b>z</b>							
<b>De</b> <b>[Barra]</b>	<b>Para</b> <b>[Barra]</b>	<b>P</b> <i>flow</i> <b>[p.u.]</b>	<b>Q</b> <i>flow</i> <b>[p.u.]</b>	<b>Barra</b>	<b>P</b> <i>inj</i> <b>[p.u.]</b>	<b>Q</b> <i>inj</i> <b>[p.u.]</b>	<b>V</b> <i>mag</i> <b>[p.u.]</b>
1	2	2.14436	-0.32852	1	3.08890	-0.23694	1.06008
1	5	0.94530	0.09157	2	0.23795	0.60853	1.04495
5	1	-0.90160	0.05649	3	-1.22464	0.26599	1.01022
2	3	0.92220	0.04083	15	0.00000	0.00000	
3	2	-0.88546	0.09249	16	0.00000	0.00000	
4	2	-0.75048	0.04929				
5	2	-0.57765	-0.01577				
3	4	-0.33916	0.17342				
4	5	-0.77262	0.17631				
7	4	-0.33738	0.07730				
4	9	0.18802	-0.07059				
6	5	-0.52076	-0.00801				
6	11	0.10846	0.11436				
6	12	0.10548	0.04185				
13	6	-0.23563	-0.12245				
7	8	0.00000	-0.29057				
9	7	-0.35245	-0.19261				
10	9	-0.05681	0.00928				
9	14	0.11231	0.00697				
10	11	-0.06025	-0.08460				
13	12	-0.02444	-0.01807				
14	13	-0.08280	-0.06149				

FONTE: O autor (2020).

De acordo com a metodologia desenvolvida para o *TCSC-SE*, em função da presença dos controladores no sistema são inseridas duas novas medidas em **z**. Conforme disposto na TABELA 17, são acrescidas ao vetor de medidas as injeções nulas de potência ativa e reativa nas barras 15 e 16, ou seja, as injeções de potência nas barras adicionais de conexão dos controladores.

A partir do conjunto de medidas da TABELA 17, as variáveis de estado estimadas pelo *TCSC-SE* para o caso Indutivo 1 do sistema *IEEE* 14 barras são apresentadas na TABELA 18, em conjunto com as variáveis de estado calculadas via *FCDR* para sistemas com *FACTS*. As melhores estimativas obtidas são destacadas em negrito sublinhado, enquanto que as mais distantes dos valores calculados são destacadas em negrito simples. Para esse cenário de simulação, o *TCSC-SE* obteve a solução convergida em dez meias-iterações ativas e nove meias-iterações reativas.

TABELA 18 - VARIÁVEIS DE RESTADO CALCULADAS E ESTIMADAS NO CASO INDUTIVO 1 DO SISTEMA *IEEE* 14 BARRAS

Barra	V [p.u.]	$\hat{V}$ [p.u.]	$\theta$ [rad]	$\hat{\theta}$ [rad]	De [Barra]	Para [Barra]	$x^{TCSC}$ [p.u.]	$\hat{x}^{TCSC}$ [p.u.]
1	1.06000	1.05997	0.00000	0.00000	1	15	<b><u>0.02579</u></b>	<b><u>0.02581</u></b>
2	1.04500	1.04497	-0.12007	-0.12003	2	16	<b><u>0.03195</u></b>	<b><u>0.03201</u></b>
3	<b><u>1.01000</u></b>	<b><u>1.01000</u></b>	-0.31927	-0.31926				
4	1.00441	1.00444	-0.25015	-0.25014				
5	1.00790	1.00792	-0.21568	-0.21567				
6	1.07000	1.07002	-0.34665	-0.34664				
7	1.04081	1.04083	-0.31918	-0.31919				
8	1.09000	1.09000	-0.31918	-0.31919				
9	1.01931	1.01935	-0.35574	-0.35574				
10	1.01830	1.01833	-0.36066	-0.36064				
11	1.03914	1.03917	-0.35630	-0.35627				
12	<b><u>1.04810</u></b>	<b><u>1.04815</u></b>	<b><u>-0.36611</u></b>	<b><u>-0.36617</u></b>				
13	1.03943	1.03944	-0.36697	-0.36694				
14	1.00388	1.00389	-0.38457	-0.38452				
15	1.05802	1.05800	<b><u>-0.02174</u></b>	<b><u>-0.02175</u></b>				
16	1.04413	1.04412	-0.14708	-0.14708				

FONTE: O autor (2020).

Os resultados apresentados na TABELA 18 permitem verificar que o *TCSC-SE* é capaz de estimar as variáveis de estado tradicionais e também as reatâncias equivalentes dos controladores presentes no sistema com boa precisão. Além disso, conforme o esperado para o caso Indutivo 1, as reatâncias equivalentes dos *TCSCs* indicam que os controladores estão de fato atuando na região indutiva, de forma a limitar o fluxo de potência ativa nos ramos controlados ao valor especificado para esse caso de simulação.

Por se tratar de um controlador série puramente reativo, espera-se que o fluxo de potência ativa controlado pelo *TCSC* (que flui da barra emissora para a barra adicional associada ao controlador) seja igual ao fluxo de potência ativa que flui pela linha de transmissão controlada pelo dispositivo (da barra adicional associada ao controlador para a barra receptora). Ou seja, para o caso do sistema *IEEE* 14 barras, o fluxo de potência ativa  $P_{1-15}$  deve ser igual à  $P_{15-5}$ , assim como  $P_{2-16}$  deve ser igual à  $P_{16-3}$ . Os fluxos de potência calculados para os ramos controlados a partir das variáveis de estado estimadas e calculadas para o caso Indutivo 1 são apresentados na TABELA 19. O resultado associado ao menor resíduo (em módulo) para esse caso de simulação é destacado em negrito sublinhado, enquanto que o resultado associado ao maior resíduo (em módulo) é destacado em negrito simples.

TABELA 19 - FLUXOS DE POTÊNCIA ATIVA ESTIMADOS E CALCULADOS NOS RAMOS CONTROLADOS PARA O CASO INDUTIVO 1 DO SISTEMA *IEEE* 14 BARRAS

$P_{flow}$	Est. [p.u.]	Calc. [p.u.]	Res.
$P_{1-15}$	0.94510	0.94530	1.9536E-04
$P_{15-5}$	0.94516	0.94530	1.3928E-04
$P_{2-16}$	<b>0.92171</b>	<b>0.92220</b>	<b>4.9392E-04</b>
$P_{16-3}$	<b><u>0.92211</u></b>	<b><u>0.92220</u></b>	<b><u>8.6934E-05</u></b>

FONTE: O autor (2020).

Ao comparar os fluxos calculados e estimados em cada um dos ramos controlados é possível verificar indiretamente a precisão do *TCSC-SE*, demonstrando a eficiência do método proposto.

O mesmo procedimento realizado para o caso Indutivo 1 é realizado para o caso Indutivo 2, onde os fluxos de potência dos ramos críticos são especificados como  $P_{1-5} = 0,8956$  e  $P_{2-3} = 0,8737$ . As variáveis de estado calculadas e estimadas no caso Indutivo 2 são apresentadas na TABELA 20. As melhores estimativas obtidas são destacadas em negrito sublinhado, enquanto que as mais distantes dos valores calculados são destacadas em negrito simples.

TABELA 20 - VARIÁVEIS DE RESTADO CALCULADAS E ESTIMADAS NO CASO INDUTIVO 2 DO SISTEMA *IEEE* 14 BARRAS

Barra	V [p.u.]	$\hat{V}$ [p.u.]	$\theta$ [rad]	$\hat{\theta}$ [rad]	De [Barra]	Para [Barra]	$x^{TCSC}$ [p.u.]	$\hat{x}^{TCSC}$ [p.u.]
1	1.06000	1.05981	0.00000	0.00000	1	15	<b>0.05437</b>	<b>0.05442</b>
2	1.04500	1.04481	<b>-0.12331</b>	<b>-0.12336</b>	2	16	<b>0.06740</b>	<b>0.06744</b>
3	1.01000	1.00980	-0.34075	-0.34091				
4	1.00378	1.00359	-0.26232	-0.26243				
5	1.00721	1.00703	-0.22773	-0.22782				
6	1.07000	1.06980	-0.35886	-0.35900				
7	1.04052	1.04033	-0.33137	-0.33148				
8	1.09000	1.08980	-0.33137	-0.33148				
9	1.01904	1.01885	-0.36794	-0.36806				
10	1.01807	1.01787	-0.37285	-0.37298				
11	1.03902	1.03881	-0.36850	-0.36862				
12	<b><u>1.04808</u></b>	<b><u>1.04792</u></b>	<b>-0.37832</b>	<b>-0.37855</b>				
13	<b><u>1.03939</u></b>	<b><u>1.03917</u></b>	-0.37918	-0.37930				
14	1.00370	1.00350	-0.39678	-0.39694				
15	1.05563	1.05544	-0.04353	-0.04359				
16	1.04270	1.04253	-0.17737	-0.17748				

FONTE: O autor (2020).

Os resultados para o caso Indutivo 2 foram obtidos em dez meias-iterações ativas e nove meias-iterações reativas. Nesse cenário, especificam-se para os ramos críticos fluxos de potência ativa 10% inferiores aos obtidos no caso base, e permitem verificar a eficácia do *TCSC-SE* para casos de maior regulação indutiva. Novamente, a comparação numérica entre os resultados calculados e estimados demonstra que o estimador foi capaz de estimar as variáveis de estado do sistema com grande precisão, mesmo sob condições de operação mais severas. Como era de se esperar para esse caso de simulação, os *TCSCs* fornecem maior compensação indutiva série se comparado ao caso Indutivo 1, em que os fluxos de potência ativa especificados nos ramos controlados são 5% inferiores aos do caso base.

Uma vez que o *TCSC-SE* se mostra aplicável aos casos em que o *TCSC* opera na região indutiva, conforme indicado pela nomenclatura adotada, nos casos Capacitivo 1 e Capacitivo 2 deseja-se verificar a aplicabilidade do método para os casos em que os *TCSCs* operam fornecendo na região capacitiva. Nesses casos os fluxos de potência ativa especificados nos ramos críticos são superiores aos fluxos obtidos no caso base, assim, espera-se que a reatância equivalente dos controladores assumam característica capacitiva, reduzindo o comprimento elétrico dos ramos controlados para permitir uma maior capacidade de transmissão aos mesmos. Numericamente, isso pode ser verificado pelo sinal da reatância equivalente do controlador, que é negativa ao assumir característica capacitiva.

Para o caso Capacitivo 1, os fluxos de potência dos ramos críticos são especificados como  $P_{1-5} = 1,0548$  e  $P_{2-3} = 1,0290$ . Tais fluxos são 6% superiores aos obtidos no caso base. As variáveis de estado calculadas e estimadas nesse caso são apresentadas na TABELA 21. As melhores estimativas obtidas são destacadas em negrito e sublinhado, enquanto que as mais distantes dos valores calculados são destacadas em negrito simples.

TABELA 21 – VARIÁVEIS DE RESTADO CALCULADAS E ESTIMADAS NO CASO CAPACITIVO 1 DO SISTEMA IEEE 14 BARRAS

Barra	V [p.u.]	$\hat{V}$ [p.u.]	$\theta$ [rad]	$\hat{\theta}$ [rad]	De [Barra]	Para [Barra]	$x^{TCSC}$ [p.u.]	$\hat{x}^{TCSC}$ [p.u.]
1	1.06000	1.05996	0.00000	0.00000	1	15	<u>-0.02782</u>	<u>-0.02778</u>
2	1.04500	1.04496	-0.11329	-0.11329	2	16	<b>-0.03450</b>	<b>-0.03445</b>
3	1.01000	1.00997	-0.27326	-0.27328				
4	1.00536	1.00532	-0.22409	-0.22409				
5	1.00884	1.00881	<b>-0.18980</b>	<b>-0.18980</b>				
6	1.07000	1.06995	-0.32052	-0.32054				

7	1.04124	1.04119	-0.29308	-0.29306
8	1.09000	1.08994	-0.29308	-0.29305
9	1.01973	1.01968	-0.32964	-0.32963
10	1.01865	1.01860	-0.33455	-0.33453
11	1.03932	1.03926	-0.33019	-0.33019
12	1.04813	1.04807	-0.33998	-0.33999
13	<b>1.03949</b>	<b>1.03943</b>	-0.34085	-0.34087
14	1.00415	1.00410	-0.35845	-0.35846
15	1.06174	1.06170	0.02608	0.02603
16	<b><u>1.04493</u></b>	<b><u>1.04490</u></b>	<b>-0.08077</b>	<b>-0.08082</b>

FONTE: O autor (2020).

Os resultados apresentados na TABELA 21 foram obtidos em dez meias-iterações ativas e nove meias-iterações reativas, e permitem verificar que o *TCSC-SE* é capaz de estimar tanto as variáveis de estado tradicionais quanto as reatâncias equivalentes dos controladores com alto grau de precisão também nos casos em que os *TCSCs* operam na região capacitiva. Conforme o esperado, quando se especificam nos ramos críticos fluxos de potência ativa superiores aos obtidos no caso base, as reatâncias equivalentes dos controladores assumem característica capacitiva, permitindo que fluxos de potência ativa superiores fluam pelos ramos compensados.

Similarmente ao que foi feito para o caso Indutivo 1, na TABELA 22 são apresentados os resultados calculados e estimados para os fluxos de potência ativa dos ramos críticos. O resultado associado ao menor resíduo (em módulo) para esse caso de simulação é destacado em negrito sublinhado, enquanto que o resultado associado ao maior resíduo (em módulo) é destacado em negrito simples. Vale lembrar que tais valores são calculados a partir das variáveis de estado calculadas e estimadas, respectivamente, e permitem verificar se o controlador está de fato atuando para manter os fluxos de potência ativa nos ramos controlados nos valores especificados para os mesmos.

TABELA 22 - FLUXOS DE POTÊNCIA ATIVA ESTIMADOS E CALCULADOS NOS RAMOS CONTROLADOS PARA O CASO CAPACITIVO 1 DO SISTEMA *IEEE* 14 BARRAS

$P_{flow}$	Est. [p.u.]	Calc. [p.u.]	Res.
$P_{1-15}$	<b>1.05449</b>	<b>1.05480</b>	<b>3.0738E-04</b>
$P_{15-5}$	1.05451	1.05480	2.9416E-04
$P_{2-16}$	<b><u>1.02875</u></b>	<b><u>1.02900</u></b>	<b><u>2.4931E-04</u></b>
$P_{16-3}$	1.02874	1.02900	2.6121E-04

FONTE: O autor (2020).



Os resultados apresentados na TABELA 22 permitem verificar que os fluxos de potência ativa estimados nos ramos dos *TCSCs* (entre a barra emissora e a barra adicional de conexão dos controladores) são muito próximos dos fluxos de potência ativa estimados nas linhas de transmissão controladas pelos dispositivos (entre a barra adicional de conexão dos controladores e a barra receptora), sendo também iguais aos fluxos de potência especificados para esses ramos. Assim, conclui-se que as reatâncias equivalentes dos *TCSCs*, assim como os módulos e ângulos das tensões nas barras, foram estimados pelo *TCSC-SE* com um bom nível de aproximação mesmo quando os controladores operam na região capacitiva.

Com intuito de verificar a aplicabilidade do *TCSC-SE* para casos mais severos onde os fluxos de potência ativa especificados nos ramos controlados são 10% superiores aos do caso base, faz-se a simulação para o caso Capacitivo 2. Nesse cenário, os fluxos de potência ativa dos ramos críticos são especificados como  $P_{1-5} = 1,0946$  e  $P_{2-3} = 1,0678$ . Os resultados para as variáveis de estado calculadas e estimadas no caso Capacitivo 2 do sistema *IEEE 14* barras, obtidos em quatorze meias-iterações ativas e treze meias-iterações reativas são apresentados na TABELA 23. As melhores estimativas obtidas são destacadas em negrito sublinhado, enquanto que as mais distantes dos valores calculados são destacadas em negrito simples.

TABELA 23 - VARIÁVEIS DE RESTADO CALCULADAS E ESTIMADAS NO CASO CAPACITIVO 2 DO SISTEMA IEEE 14 BARRAS

Barra	V [p.u.]	$\hat{V}$ [p.u.]	$\theta$ [rad]	$\hat{\theta}$ [rad]	De [Barra]	Para [Barra]	$x^{TCSC}$ [p.u.]	$\hat{x}^{TCSC}$ [p.u.]
1	1.06000	1.06009	0.00000	0.00000	1	15	<u>-0.04471</u>	<u>-0.04471</u>
2	1.04500	1.04510	-0.11095	-0.11092	2	16	<u>-0.05554</u>	<u>-0.05554</u>
3	1.01000	1.01011	-0.25698	-0.25692				
4	1.00555	1.00566	-0.21487	-0.21483				
5	1.00898	1.00909	-0.18061	-0.18057				
6	1.07000	1.07008	-0.31129	-0.31123				
7	1.04132	1.04142	-0.28385	-0.28381				
8	1.09000	1.09011	-0.28385	-0.28382				
9	1.01982	1.01991	-0.32042	-0.32037				
10	1.01872	1.01881	-0.32532	-0.32526				
11	1.03935	1.03944	-0.32096	-0.32091				
12	<b><u>1.04814</u></b>	<b><u>1.04828</u></b>	<b><u>-0.33075</u></b>	<b><u>-0.33075</u></b>				
13	<b><u>1.03951</u></b>	<b><u>1.03958</u></b>	<b><u>-0.33162</u></b>	<b><u>-0.33154</u></b>				
14	1.00421	1.00432	-0.34922	-0.34915				
15	1.06245	1.06254	0.04348	0.04346				
16	1.04388	1.04398	-0.05656	-0.05654				

FONTE: O autor (2020).

A comparação numérica entre os resultados apresentados na TABELA 23 permite verificar que mesmo sob uma condição de compensação série capacitiva mais severa o *TCSC-SE* é capaz de estimar com precisão as variáveis de estado do sistema *IEEE* 14 barras. Similarmente ao ocorrido no caso Capacitivo 1, no caso Capacitivo 2 as reatâncias equivalentes dos controladores assumiram característica capacitiva de forma a manter os fluxos de potência ativa especificados para os ramos controlados.

A análise dos resultados obtidos para os quatro cenários de simulação definidos para o sistema *IEEE* 14 barras demonstra uma funcionalidade extra do *TCSC-SE*, que pode também ser utilizado para verificar a resposta do sistema frente às condições operativas especificadas para um sistema. Em suma, desde que a topologia e os dados de geração e carregamento de um sistema sejam conhecidos, o *TCSC-SE* funciona como um estimador de estado tradicional, retornando uma estimativa das variáveis de estado do sistema a partir de um conjunto de medidas de magnitude de tensão, fluxo e injeções de potência. Para os casos em que diferentes condições operativas sejam impostas, o *TCSC-SE* é capaz de gerar um conjunto de medidas esperadas e, a partir desses dados, estimar as variáveis de estado do sistema.

Assim, conclui-se que para sistemas de porte pequeno e característica predominantemente radial, como o sistema *IEEE* 14 barras, o *TCSC-SE* apresenta desempenho satisfatório. Para verificar sua aplicabilidade a sistemas de maior porte e com configurações distintas, são conduzidos os testes para os sistemas *IEEE* de 30 e 118 barras, apresentados e discutidos nas seções subsequentes.

#### 5.2.4 Sistema *IEEE* 30 Barras

De acordo com as premissas definidas para a escolha de ramos críticos apresentadas anteriormente, a partir do resultado do fluxo de carga para o caso base são escolhidos dois ramos do sistema *IEEE* 30 barras onde são inseridos *TCSCs*. Tais ramos, considerados críticos, são aqueles cujos fluxos de potência ativa correspondem à maior porcentagem do limite teórico calculado para cada ramo. Nessas condições, os ramos críticos do sistema *IEEE* 30 barras, os respectivos limites

teóricos de fluxo de potência ativa, fluxos de potência ativa obtidos para o caso base e percentuais relativos aos limites teóricos são apresentados na TABELA 24.

TABELA 24 - DEFINIÇÃO DOS RAMOS CRÍTICOS DO SISTEMA *IEEE* 30 BARRAS

# ramo	De [Barra]	Para [Barra]	Reatância [p.u.]	Limite Teórico Fluxo [p.u.]	Fluxo Base [p.u.]	% Limite teórico
1	2	6	0.18000	5.55556	0.20271	3.65%
2	27	30	0.60000	1.66667	0.07122	4.27%

FONTE: O autor (2020).

Com a definição dos ramos críticos 1 – 2 e 2 – 27, de acordo com as premissas adotadas para a definição dos planos de medição e cenários de simulação apresentadas na Seção 5.2.2, o plano de medição adotado para o sistema *IEEE* 30 barras é apresentado na TABELA 25.

TABELA 25 - PLANO DE MEDIÇÃO DEFINIDO PARA O SISTEMA *IEEE* 30 BARRAS

$P_{flow}$ e $Q_{flow}$ [p.u.]			$P_{inj}$ , $Q_{inj}$ e $V_{mag}$ [p.u.]	
# Medida	De [Barra]	Para [Barra]	# Medida	Barra
1	1	2	1	1
2	2	1	2	2
3	1	3	3	7
4	3	1	4	8
5	2	4	5	12
6	3	4	6	13
7	5	2	7	21
8	2	6	8	22
9	6	2	9	23
10	6	4	10	27
11	5	7	11	30
12	6	7		
13	8	6		
14	6	9		
15	9	6		
16	6	10		
17	11	9		
18	10	9		
19	4	12		
20	12	13		
21	14	12		
22	15	12		
23	12	16		
24	14	15		
25	16	17		
26	17	16		
27	15	18		
28	19	18		

29	19	20
30	10	20
31	20	10
32	17	10
33	10	21
34	10	22
35	22	21
36	15	23
37	24	22
38	24	23
39	24	25
40	25	26
41	27	25
42	28	27
43	27	29
44	27	30
45	30	27
46	30	29
47	8	28
48	6	28
49	28	6

FONTE: O autor (2020).

Conforme os dados apresentados na TABELA 25, o plano de medição adotado para o sistema *IEEE* 30 barras considera a existência de quarenta e nove medidas de fluxo de potência ativa e reativa, assim como 11 medidas de magnitudes de tensão, injeções de potência ativa e reativa. Na TABELA 26 são apresentados os quatro cenários de simulação definidos para o sistema *IEEE* 30 barras, definidos em função dos fluxos de potência ativa especificados nos ramos críticos.

TABELA 26 - CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO DEFINIDOS PARA O SISTEMA *IEEE* 30 BARRAS

# TCSC	De [Barra]	Para [Barra]	$P_{Crít}^{esp}$ por cenário de simulação			
			Indutivo 1	Indutivo 2	Capacitivo 1	Capacitivo 2
1	2	6	0.1925	0.1824	0.2128	0.2229
2	27	30	0.0676	0.0641	0.0747	0.0783

FONTE: O autor (2020).

Com a definição dos ramos críticos, do plano de medição e dos cenários de simulação, inicialmente conduz-se o teste do *TCSC-SE* para o caso base do sistema *IEEE* 30 barras, onde não há *TCSCs* inseridos no sistema. Tais resultados, que incluem os módulos e ângulos das tensões calculadas e estimadas para o caso base, foram obtidos pelo *TCSC-SE* em seis Meias-iterações ativas e seis Meias-iterações reativas, e são apresentados na TABELA 27. As melhores estimativas obtidas são destacadas em **negrito sublinhado**, enquanto que as mais distantes dos valores calculados são destacadas em **negrito simples**.

TABELA 27 - VARIÁVEIS DE RESTADO CALCULADAS E ESTIMADAS NO CASO BASE DO SISTEMA *IEEE* 30 BARRAS

Barra	V [p.u.]	$\hat{V}$ [p.u.]	$\theta$ [rad]	$\hat{\theta}$ [rad]
1	1.00000	1.00006	0.00000	0.00000
2	1.00000	1.00006	<b>-0.00725</b>	<b>-0.00725</b>
3	0.98316	0.98322	-0.02657	-0.02657
4	0.98012	0.98018	-0.03133	-0.03133
5	0.98262	0.98268	-0.03259	-0.03260
6	0.97323	0.97329	-0.03957	-0.03957
7	0.96747	0.96753	-0.04631	-0.04631
8	0.96067	0.96073	-0.04758	-0.04757
9	0.98053	0.98062	-0.05231	-0.05231
10	0.98441	0.98449	-0.05891	-0.05892
11	0.98053	0.98061	-0.05231	-0.05235
12	0.98548	0.98553	-0.02683	-0.02681
13	1.00000	1.00006	0.02576	0.02579
14	0.97668	0.97675	-0.04029	-0.04025
15	0.98024	0.98029	-0.04035	-0.04033
16	0.97740	0.97747	-0.04616	-0.04616
17	0.97687	0.97694	-0.05921	-0.05923
18	0.96845	0.96853	-0.06071	-0.06071
19	0.96530	0.96537	-0.06909	-0.06909
20	0.96917	0.96924	-0.06756	-0.06758
21	0.99339	0.99346	-0.06088	-0.06090
22	1.00000	1.00008	-0.05921	-0.05923
23	1.00000	1.00008	-0.02774	-0.02772
24	<b>0.98860</b>	<b>0.98871</b>	<b>-0.04595</b>	<b>-0.04589</b>
25	0.99023	0.99026	-0.02951	-0.02954
26	0.97221	0.97226	-0.03735	-0.03731
27	1.00000	1.00002	-0.01446	-0.01451
28	0.97475	0.97482	-0.03955	-0.03954
29	0.97960	0.97957	-0.03715	-0.03716
30	<b>0.96788</b>	<b>0.96790</b>	-0.05309	-0.05310

FONTE: O autor (2020).

Os resultados obtidos para o caso base demonstram que um pequeno aumento no porte do sistema-teste não compromete a eficiência do *TCSC-SE* para o caso em que não existem controladores *FACTS* no sistema. A comparação numérica entre os resultados calculados pelo *FCDR* para sistemas com *TCSC* e estimados pelo *TCSC-SE* indicam boa aproximação para as variáveis de estado estimadas.

Considerando que o *TCSC-SE* se mostra aplicável para o caso base do sistema *IEEE* 30 barras, procede-se com os testes para os quatro cenários de simulação apresentados na TABELA 26. Inicialmente são conduzidos os testes para os casos Indutivo 1 e Indutivo 2, onde os fluxos de potência ativa especificados nos ramos críticos são inferiores aos obtidos no caso base. Assim, as variáveis de estado calculadas e estimadas no caso Indutivo 1 são apresentadas na TABELA 28. Os resultados obtidos para o caso Indutivo 2 são apresentados na TABELA 29. As

melhores estimativas obtidas são destacadas em negrito sublinhado, enquanto que as mais distantes dos valores calculados são destacadas em negrito simples.

TABELA 28 - VARIÁVEIS DE RESTADO CALCULADAS E ESTIMADAS NO CASO INDUTIVO 1 DO SISTEMA IEEE 30 BARRAS

Barra	V [p.u.]	$\hat{V}$ [p.u.]	$\theta$ [rad]	$\hat{\theta}$ [rad]	De [Barra]	Para [Barra]	$x^{TCSC}$ [p.u.]	$\hat{x}^{TCSC}$ [p.u.]
1	1.00000	0.99996	0.00000	0.00000	2	31	<u>0.01498</u>	<u>0.01483</u>
2	<b>1.00000</b>	<b>0.99995</b>	-0.00706	-0.00706	27	32	<b>0.08731</b>	<b>0.08867</b>
3	0.98300	0.98299	-0.02711	-0.02712				
4	0.97993	0.97992	-0.03199	-0.03200				
5	0.98252	0.98254	-0.03296	-0.03302				
6	0.97297	0.97295	-0.04053	-0.04054				
7	0.96727	0.96727	-0.04703	-0.04706				
8	0.96041	0.96040	-0.04854	-0.04855				
9	0.98040	0.98039	-0.05322	-0.05325				
10	0.98435	0.98434	-0.05979	-0.05982				
11	0.98040	0.98040	-0.05322	-0.05323				
12	0.98543	0.98542	-0.02760	-0.02762				
13	1.00000	0.99999	0.02499	0.02496				
14	0.97665	0.97665	-0.04108	-0.04110				
15	0.98020	0.98020	-0.04116	-0.04117				
16	0.97735	0.97733	-0.04698	-0.04701				
17	0.97682	0.97679	-0.06008	-0.06011				
18	0.96840	0.96838	-0.06155	-0.06157				
19	0.96524	0.96523	-0.06994	-0.06996				
20	0.96912	0.96911	-0.06843	-0.06845				
21	0.99337	0.99335	-0.06179	-0.06182				
22	1.00000	0.99998	-0.06012	-0.06016				
23	1.00000	1.00003	<b>-0.02860</b>	<b>-0.02859</b>				
24	0.98860	0.98861	-0.04685	-0.04683				
25	0.99023	0.99023	-0.03043	-0.03039				
26	0.97221	0.97224	-0.03827	-0.03822				
27	1.00000	1.00003	-0.01540	-0.01540				
28	0.97452	0.97451	-0.04051	-0.04053				
29	0.97912	0.97912	-0.03978	-0.03977				
30	0.96695	0.96696	-0.05760	-0.05763				
31	0.99891	0.99888	-0.00995	-0.00992				
32	<b>0.99846</b>	<b>0.99846</b>	<b>-0.02132</b>	<b>-0.02140</b>				

FONTE: O autor (2020).

TABELA 29 - VARIÁVEIS DE RESTADO CALCULADAS E ESTIMADAS NO CASO INDUTIVO 2 DO SISTEMA IEEE 30 BARRAS

Barra	V [p.u.]	$\hat{V}$ [p.u.]	$\theta$ [rad]	$\hat{\theta}$ [rad]	De [Barra]	Para [Barra]	$x^{TCSC}$ [p.u.]	$\hat{x}^{TCSC}$ [p.u.]
1	1.00000	0.99998	0.00000	0.00000	2	31	<u>0.03135</u>	<u>0.03133</u>
2	1.00000	0.99997	<b>-0.00688</b>	<b>-0.00688</b>	27	32	<u>0.18207</u>	<u>0.18248</u>
3	0.98283	0.98282	-0.02765	-0.02765				
4	0.97973	0.97972	-0.03264	-0.03264				
5	0.98241	0.98241	-0.03333	-0.03336				
6	0.97270	0.97269	-0.04147	-0.04147				
7	0.96705	0.96705	-0.04775	-0.04776				
8	0.96014	0.96013	-0.04949	-0.04949				

9	0.98027	0.98024	-0.05412	-0.05415
10	0.98429	0.98428	-0.06067	-0.06071
11	0.98027	0.98025	-0.05412	-0.05416
12	0.98539	0.98538	-0.02837	-0.02836
13	1.00000	0.99997	0.02422	0.02424
14	0.97661	0.97660	<b>-0.04186</b>	<b>-0.04181</b>
15	0.98017	0.98016	-0.04197	-0.04196
16	0.97730	0.97730	-0.04780	-0.04782
17	0.97675	0.97675	-0.06094	-0.06099
18	0.96836	0.96835	-0.06239	-0.06238
19	0.96519	0.96520	-0.07079	-0.07081
20	0.96907	0.96908	-0.06929	-0.06931
21	0.99336	0.99334	-0.06269	-0.06271
22	1.00000	0.99998	-0.06103	-0.06105
23	1.00000	1.00000	-0.02945	-0.02945
24	0.98861	0.98862	-0.04774	-0.04778
25	0.99023	0.99022	-0.03135	-0.03139
26	<b>0.97221</b>	<b>0.97221</b>	-0.03919	-0.03924
27	<b>1.00000</b>	<b>0.99996</b>	-0.01634	-0.01634
28	0.97428	0.97427	-0.04147	-0.04147
29	0.97855	0.97852	-0.04237	-0.04239
30	0.96585	0.96581	-0.06205	-0.06206
31	0.99777	0.99775	-0.01261	-0.01261
32	0.99666	0.99662	-0.02805	-0.02808

FONTE: O autor (2020).

Com a inserção dos *TCSCs* nos ramos críticos do sistema *IEEE* 30 barras, incluem-se nos resultados apresentados na TABELA 28 e na TABELA 29 as variáveis de estado calculadas e estimadas para as barras adicionais de conexão dos controladores, identificadas como barra 31 e barra 32. A partir de tais resultados, pode-se verificar que tanto as variáveis de estado tradicionais quanto as reatâncias equivalente dos *TCSCs* foram estimados com bom grau de aproximação em ambos os cenários de simulação sob análise. Verifica-se também que ao especificar fluxos de potência ativa inferiores aos dos obtidos no caso base, as reatâncias dos controladores assumiram característica indutiva a fim de limitar os fluxos de potência ativa nos ramos controlados.

O *TCSC-SE* obteve a solução convergida para os casos Indutivo 1 e Indutivo 2 do sistema *IEEE* 30 barras em seis meias-iterações ativas e seis meias-iterações reativas. É interessante ressaltar que seis é também o número de meias-iterações ativas e reativas necessárias para obter a solução convergida do caso base, onde não existem controladores no sistema. Em uma análise preliminar, esse resultado demonstra que em função do plano de medição e das características topológicas e operativas do sistema *IEEE* 30 barras, o aumento na complexidade e porte do problema de estimação de estado decorrente da inserção de novas barras e variáveis de estado não afetou as características de convergência do *TCSC-SE*.

Conforme o modelo de TCSC adotado para o TCSC-SE, apresentado na Seção 4.2.1, as barras adicionais de conexão são inseridas entre a barra emissora e a linha de transmissão do ramo controlado. Dessa forma, deve-se obter o mesmo valor ao calcular os fluxos de potência ativa a partir das variáveis de estado do ramo do TCSC (entre a barra emissora e a barra adicional de conexão do controlador) e a partir das variáveis de estado e parâmetros da linha de transmissão (entre a barra adicional de conexão do controlador e barra receptora). Tais fluxos, calculados a partir das variáveis de estado calculadas e estimadas nos casos Indutivo 1 e Indutivo 2 são apresentados na TABELA 30. Os resultados associados aos menores resíduos (em módulo) para esses casos de simulação são destacados em negrito sublinhado, enquanto que os resultados associados aos maiores resíduos (em módulo) são destacados em negrito simples.

TABELA 30 - FLUXOS DE POTÊNCIA ATIVA ESTIMADOS E CALCULADOS NOS RAMOS CONTROLADOS PARA OS CASOS INDUTIVO 1 E INDUTIVO 2 DO SISTEMA IEEE 30 BARRAS

Caso	$P_{flow}$	Est. [p.u.]	Calc. [p.u.]	Res.
Indutivo 1	$P_{2-31}$	0.19258	0.19250	8.0314E-05
	$P_{31-6}$	<b>0.19272</b>	<b>0.19250</b>	<b>2.2340E-04</b>
	$P_{27-32}$	0.06752	0.06760	1.4474E-04
	$P_{32-30}$	<u><b>0.06759</b></u>	<u><b>0.06760</b></u>	<u><b>7.4382E-05</b></u>
Indutivo 2	$P_{2-31}$	<b>0.18244</b>	<b>0.18240</b>	<b>3.8348E-05</b>
	$P_{31-6}$	0.18239	0.18240	9.2703E-06
	$P_{27-32}$	<u><b>0.06409</b></u>	<u><b>0.06410</b></u>	<u><b>6.4590E-06</b></u>
	$P_{32-30}$	0.06407	0.06410	3.1996E-05

FONTE: O autor (2020).

Conforme o esperado, de acordo com os resultados apresentados na TABELA 30, o fluxo de potência ativa estimado no ramo 2–31 é muito próximo do fluxo de potência ativa estimado no ramo 31–6. O mesmo ocorre para o fluxo de potência estimado para os ramos 27–32 e 32–30. A proximidade numérica entre os fluxos de potência ativa calculados nos ramos controlados a partir das variáveis de estado calculadas e estimadas para os casos Indutivo 1 e Indutivo 2 do sistema IEEE 30 barras demonstram que o TCSC-SE foi capaz de estimar corretamente as reatâncias equivalentes dos TCSCs, as variáveis de estado das barras terminais dos ramos



controlados, bem como as variáveis de estado associadas às barras adicionais de conexão dos controladores. As variáveis de estado associadas às barras de conexão adicionais estimadas pelo *TCSC-SE* podem ser utilizadas para avaliar pontualmente as condições operativas de cada controlador. A partir dessas variáveis pode-se obter, além do fluxo de potência ativa que percorre o *TCSC*, também a potência reativa absorvida ou fornecida pelo dispositivo, bem como a queda de tensão provocada pelo mesmo.

Após a realização dos testes para os casos indutivos, dá-se sequência aos testes do *TCSC-SE* para os cenários capacitivos definidos para o sistema *IEEE 30* barras. Para tanto, especificam-se fluxos de potência superiores aos obtidos no caso base nos ramos críticos do sistema, conforme disposto na TABELA 26. Nesses cenários de simulação, espera-se que as reatâncias equivalentes dos controladores assumam característica capacitiva, elevando a capacidade de transmissão de potência ativa nos ramos em que estão inseridos. As variáveis de estado calculadas e estimadas no cenário Capacitivo 1 são apresentados na TABELA 31, enquanto que os resultados obtidos para o cenário Capacitivo 2 são apresentados na TABELA 32. As melhores estimativas obtidas são destacadas em negrito sublinhado, enquanto que as mais distantes dos valores calculados são destacadas em negrito simples.

TABELA 31 - VARIÁVEIS DE ESTADO CALCULADAS E ESTIMADAS NO CASO CAPACITIVO 1 DO SISTEMA *IEEE 30* BARRAS

Barra	V [p.u.]	$\hat{V}$ [p.u.]	$\theta$ [rad]	$\hat{\theta}$ [rad]	De [Barra]	Para [Barra]	$x^{TCSC}$ [p.u.]	$\hat{x}^{TCSC}$ [p.u.]
1	1.00000	1.00003	0.00000	0.00000	2 27	31 32	<u>-0.01349</u>	<u>-0.01333</u>
2	1.00000	1.00002	-0.00744	-0.00743			<b>-0.08080</b>	<b>-0.08206</b>
3	0.98331	0.98336	-0.02603	-0.02603				
4	0.98030	0.98035	<b>-0.03068</b>	<b>-0.03068</b>				
5	0.98271	0.98279	-0.03223	-0.03222				
6	0.97347	0.97352	-0.03863	-0.03862				
7	0.96766	0.96772	-0.04559	-0.04558				
8	0.96090	0.96096	-0.04663	-0.04663				
9	0.98064	0.98071	-0.05141	-0.05140				
10	0.98447	0.98453	-0.05803	-0.05803				
11	0.98064	0.98070	-0.05141	-0.05139				
12	0.98552	0.98558	-0.02607	-0.02605				
13	1.00000	1.00006	0.02652	0.02653				
14	0.97672	0.97678	-0.03951	-0.03946				
15	0.98027	0.98033	-0.03955	-0.03955				
16	0.97745	0.97752	-0.04535	-0.04535				
17	0.97693	0.97699	-0.05835	-0.05835				
18	0.96849	0.96855	-0.05989	-0.05988				
19	0.96534	0.96540	-0.06824	-0.06823				
20	0.96922	0.96928	-0.06671	-0.06670				

21	0.99340	0.99346	-0.05999	-0.05998
22	1.00000	1.00007	-0.05832	-0.05831
23	1.00000	1.00005	-0.02690	-0.02689
24	<b>0.98860</b>	<b>0.98871</b>	-0.04507	-0.04504
25	0.99023	0.99028	-0.02860	-0.02862
26	0.97221	0.97230	-0.03644	-0.03648
27	1.00000	1.00007	-0.01354	-0.01357
28	0.97497	0.97502	-0.03860	-0.03860
29	0.97999	0.98005	-0.03451	-0.03447
30	0.96864	0.96871	-0.04853	-0.04849
31	<b>1.00101</b>	<b>1.00102</b>	-0.00457	-0.00460
32	<b>1.00127</b>	<b>1.00136</b>	<b>-0.00751</b>	<b>-0.00743</b>

FONTE: O autor (2020).

TABELA 32 - VARIÁVEIS DE RESTADO CALCULADAS E ESTIMADAS NO CASO CAPACITIVO 2 DO SISTEMA IEEE 30 BARRAS

Barra	V [p.u.]	$\hat{V}$ [p.u.]	$\theta$ [rad]	$\hat{\theta}$ [rad]	De [Barra]	Para [Barra]	$x^{TCSC}$ [p.u.]	$\hat{x}^{TCSC}$ [p.u.]
1	1.00000	0.99999	0.00000	0.00000	2	31	<b>-0.02586</b>	<b>-0.02586</b>
2	1.00000	0.99999	-0.00763	-0.00762	27	32	<b>-0.15611</b>	<b>-0.15570</b>
3	0.98346	0.98345	<b>-0.02550</b>	<b>-0.02550</b>				
4	0.98047	0.98046	-0.03003	-0.03003				
5	0.98280	0.98280	-0.03187	-0.03184				
6	0.97368	0.97368	-0.03769	-0.03768				
7	0.96783	0.96782	-0.04488	-0.04487				
8	0.96112	0.96112	-0.04568	-0.04568				
9	0.98075	0.98074	-0.05051	-0.05051				
10	0.98452	0.98451	-0.05716	-0.05716				
11	0.98075	0.98072	-0.05051	-0.05051				
12	0.98555	0.98554	-0.02530	-0.02530				
13	1.00000	0.99997	0.02728	0.02728				
14	0.97675	0.97674	-0.03873	-0.03871				
15	0.98029	0.98027	-0.03875	-0.03876				
16	0.97750	0.97749	-0.04454	-0.04456				
17	0.97698	0.97697	-0.05750	-0.05750				
18	0.96853	0.96849	-0.05906	-0.05910				
19	0.96539	0.96538	-0.06740	-0.06743				
20	0.96927	0.96926	-0.06586	-0.06588				
21	0.99341	0.99339	-0.05910	-0.05910				
22	1.00000	0.99998	-0.05742	-0.05742				
23	1.00000	0.99999	-0.02606	-0.02607				
24	0.98860	0.98860	-0.04419	-0.04417				
25	0.99023	0.99025	-0.02771	-0.02768				
26	<b>0.97221</b>	<b>0.97234</b>	<b>-0.03555</b>	<b>-0.03541</b>				
27	1.00000	1.00002	-0.01264	-0.01259				
28	0.97516	0.97516	-0.03766	-0.03765				
29	0.98029	0.98032	-0.03185	-0.03178				
30	0.96922	0.96926	-0.04392	-0.04387				
31	1.00196	1.00195	-0.00188	-0.00187				
32	<b>1.00225</b>	<b>1.00225</b>	-0.00043	-0.00043				

FONTE: O autor (2020).

Em uma primeira análise, a comparação numérica entre os resultados calculados e estimados permite concluir que o *TCSC-SE* estimou as variáveis de estado do sistema com grande precisão nos dois cenários de simulação capacitivos.

Confirmando o comportamento esperado para tais simulações, as reatâncias equivalentes dos controladores assumiram característica capacitiva em ambos os cenários. Os resultados para os casos Capacitivo 1 e Capacitivo 2 foram obtidos pelo *TCSC-SE* em seis meias-iterações ativas e reativas, os mesmos números necessários para a obtenção das soluções convergidas no caso base e casos indutivos. Dessa forma, conclui-se que os cenários de simulação adotados, a presença ou modo de operação dos controladores não alteram as características de convergência do *TCSC-SE* quando aplicado ao sistema *IEEE 30* barras.

De forma similar ao que foi feito para os casos indutivos, os fluxos de potência dos ramos críticos, calculados a partir das variáveis de estado calculadas via *FCDR* para sistemas com *TCSC* e estimadas pelo *TCSC-SE* são apresentados na TABELA 33. Os resultados associados aos menores resíduos (em módulo) para esses casos de simulação são destacados em **negrito sublinhado**, enquanto que os resultados associados aos maiores resíduos (em módulo) são destacados em **negrito simples**.

TABELA 33 - FLUXOS DE POTÊNCIA ATIVA ESTIMADOS E CALCULADOS NOS RAMOS CONTROLADOS PARA OS CASOS CAPACITIVO 1 E CAPACITIVO 2 DO SISTEMA *IEEE 30* BARRAS

Caso	$P_{flow}$	Est. [p.u.]	Calc. [p.u.]	Res.
<b>Capacitivo 1</b>	$P_{2-31}$	<b><u>0.21285</u></b>	<b><u>0.21280</u></b>	<b>4.7747E-05</b>
	$P_{31-6}$	<b>0.21257</b>	<b>0.21280</b>	<b>2.3237E-04</b>
	$P_{27-32}$	0.07492	0.07478	1.3208E-04
	$P_{32-30}$	0.07485	0.07478	6.3462E-05
<b>Capacitivo 2</b>	$P_{2-31}$	<b><u>0.22289</u></b>	<b><u>0.22290</u></b>	<b>5.2079E-06</b>
	$P_{31-6}$	0.22288	0.22290	2.0075E-05
	$P_{27-32}$	0.07827	0.07834	7.1989E-05
	$P_{32-30}$	<b>0.07826</b>	<b>0.07834</b>	<b>8.3246E-05</b>

FONTE: O autor (2020).

Os resultados apresentados na TABELA 33 demonstram indiretamente a eficiência do *TCSC-SE* em estimar as variáveis de estado nos casos Indutivos do sistema *IEEE 30* barras. Isso pode ser verificado pela proximidade numérica entre os fluxos de potência ativa calculados e estimados, mas também pela comparação entre os fluxos de potência ativa estimado no ramo do *TCSC* e o fluxo de potência ativa

estimado na linha de transmissão cujo fluxo de potência ativa é controlado pelo controlador.

De forma geral, os resultados obtidos para os quatro cenários de simulação definidos para o sistema *IEEE* 30 barras permitem concluir que a aplicabilidade do *TCSC-SE* pode ser estendida a qualquer sistema de transmissão de pequeno porte, com controladores *FACTS* ou não, desde que haja redundância suficiente no conjunto de medidas que alimenta o estimador. O método proposto apresentou boa aproximação numérica e boas propriedades de convergência em todos os cenários avaliados, mesmo sob condições mais severas de compensação. Dessa forma, resta avaliar o desempenho e a aplicabilidade do *TCSC-SE* para sistemas com dimensões ainda maiores, o que reflete a realidade de grande parte dos centros de operação e controle de sistemas de transmissão ao redor do mundo.

#### 5.2.5 Sistema *IEEE* 118 Barras

Inicialmente são definidos os ramos críticos do sistema *IEEE* 118 barras, de forma semelhante ao procedimento adotado para os sistemas de 14 e 30 barras. Conforme mencionado na Seção 5.2.2, por se tratar de um sistema-teste de dimensões maiores que os utilizados nas simulações anteriores, com intuito de verificar a aplicabilidade do *TCSC-SE* para casos mais complexos com múltiplos controladores, nessa etapa são definidos três ramos críticos para as simulações. Os ramos críticos identificados do sistema *IEEE* 118 barras, os respectivos limites teóricos de fluxo de potência ativa, fluxos de potência ativa obtidos para o caso base e percentuais relativos aos limites teóricos são apresentados na TABELA 34.

TABELA 34 - DEFINIÇÃO DOS RAMOS CRÍTICOS DO SISTEMA IEEE 118 BARRAS

# ramo	De [Barra]	Para [Barra]	Reatância [p.u.]	Limite Teórico Fluxo [p.u.]	Fluxo Base [p.u.]	% Limite teórico
1	3	12	0.16000	6.25000	1.30075	20.81%
2	25	27	0.16300	6.13497	1.35584	22.10%
3	24	70	0.41150	2.43013	0.66884	27.52%

FONTE: O autor (2020).

Conforme disposto na TABELA 34, os ramos 3–12, 25–27 e 24–70 são definidos como os ramos críticos do sistema *IEEE* 118 barras. O plano de medição adotado para esse sistema, definido de acordo com as premissas apresentadas na Seção 5.2.2, está disposto no APÊNDICE – B. Ao todo, o plano de medição definido conta com duzentos e trinta e oito medidas de fluxos de potência ativa e reativa e sessenta medidas de injeções de potência ativa, reativa e módulos de tensão.

A partir dos fluxos de potência ativa obtidos para os ramos críticos no caso base, são definidos os quatro cenários de simulação definidos para o sistema *IEEE* 118 barras, apresentados na TABELA 35 em função dos fluxos de potência ativa especificados nos ramos críticos em cada cenário.

TABELA 35 - CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO DEFINIDOS PARA O SISTEMA *IEEE* 118 BARRAS

# TCSC	De [Barra]	Para [Barra]	$P_{Crit}^{esp}$ por cenário de simulação			
			Indutivo 1	Indutivo 2	Capacitivo 1	Capacitivo 2
1	3	12	1.17060	1.10560	1.43080	1.49580
2	25	27	1.22020	1.15240	1.49146	1.55920
3	24	70	0.60190	0.56850	0.73570	0.76910

FONTE: O autor (2020).

Com a definição dos ramos críticos e dos cenários de simulação, conduz-se a simulação do caso base com o *TCSC-SE*, cujos resultados são apresentados integralmente no APÊNDICE – C. Os resultados obtidos para as variáveis de estado calculadas via *FCDR* para sistemas com *TCSC* e estimadas pelo *TCSC-SE*, para as barras terminais dos ramos críticos no caso base do sistema *IEEE* 118 barras, são apresentadas na TABELA 36. As melhores estimativas obtidas são destacadas em **negrito sublinhado**, enquanto que as mais distantes dos valores calculados são destacadas em **negrito simples**.

TABELA 36 - VARIÁVEIS DE RESTADO CALCULADAS E ESTIMADAS PARA AS BARRAS TERMINAIS DOS RAMOS CRÍTICOS NO CASO BASE DO SISTEMA *IEEE* 118 BARRAS

Barra	V [p.u.]	$\hat{V}$ [p.u.]	$\theta$ [rad]	$\hat{\theta}$ [rad]
3	<b>0.99261</b>	<b>0.99269</b>	<b>-0.15700</b>	<b>-0.15699</b>
12	0.99000	0.99008	-0.39020	-0.39016
24	0.99200	0.99208	-0.76627	-0.76614
25	<b>1.05000</b>	<b>1.05006</b>	-0.50646	-0.50637

27	0.96800	0.96807	-0.71296	-0.71285
70	0.98400	0.98408	<b>-1.05487</b>	<b>-1.05467</b>

FONTE: O autor (2020).

Os resultados apresentados na TABELA 36 permitem verificar que o *TCSC-SE* é capaz de obter uma boa estimativa para as variáveis de estado do sistema no caso em que não há controladores *FACTS* no mesmo. A fim de permitir uma análise mais aprofundada sobre a eficiência do *TCSC-SE* aplicado a sistemas de maior porte, uma nova métrica é utilizada. Os números de meias-iterações e respectivos tempos decorridos até a obtenção da solução convergida para o caso base do sistema *IEEE 118* barras são apresentados na TABELA 37.

TABELA 37 – NÚMERO DE ITERAÇÕES E TEMPO NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DA SOLUÇÃO CONVERGIDA NO CASO BASE DO SISTEMA IEEE 118 BARRAS

<i>FCDR TCSC</i>			<i>TCSC-SE</i>		
Meias-iterações Ativas	Meias-iterações Reativas	Tempo [s]	Meias-iterações Ativas	Meias-iterações Reativas	Tempo [s]
21	20	5.81835	6	5	7.33220

FONTE: O autor (2020).

Conforme os resultados apresentados na TABELA 37, o *FCDR* para sistemas com *TCSC* convergiu em vinte e uma meias-iterações ativas e vinte meias-iterações reativas que, ao todo, levaram cerca de 5,82 segundos. O *TCSC-SE* levou apenas seis meias-iterações ativas e cinco meias-iterações reativas para convergir, um número inferior ao necessário para gerar o conjunto de medidas que alimenta o estimador, porém em um tempo 26% superior ao necessário para calculá-las via *FCDR*. É interessante verificar que mesmo se tratando de um sistema de porte maior, o estimador convergiu em um número de iterações inferior aos obtidos para os casos base dos sistemas de 14 e 30 barras. Apesar disso, em função da maior dimensão das matrizes do sistema, o tempo necessário para o processamento de cada iteração do caso base do sistema *IEEE 118* barras foi maior se comparado às simulações realizadas para os sistemas menores. Essa nova métrica servirá de parâmetro de comparação para verificar os impactos causados pela adição de controladores, bem como pelo modo de operação assumido pelos mesmos, nas características de convergência do *FCDR* para sistemas com *TCSC* e no *TCSC-SE*.

Encerrada a simulação para o caso base, são realizadas as simulações para os quatro casos que consideram a presença de três *TCSCs* no sistema. Na TABELA

38 são apresentados os resultados obtidos para as variáveis de estado calculadas e estimadas para o caso Indutivo 1 do sistema *IEEE* 118. As melhores estimativas obtidas são destacadas em negrito sublinhado, enquanto que as mais distantes dos valores calculados são destacadas em negrito simples. Em razão do porte do sistema, são apresentados apenas os resultados obtidos para as reatâncias equivalentes dos *TCSCs* e variáveis de estado tradicionais das barras terminais e barras adicionais associadas aos controladores. Os resultados completos obtidos nesse caso de simulação estão dispostos no APÊNDICE – C.

TABELA 38 – RESULTADOS PARA AS REATÂNCIAS EQUIVALENTES DOS *TCSCs*, BARRAS TERMINAIS E BARRAS ADICIONAIS ASSOCIADAS AOS CONTROLADORES NO CASO INDUTIVO 1 DO SISTEMA *IEEE* 118 BARRAS

Barra	V [p.u.]	$\hat{V}$ [p.u.]	$\theta$ [rad]	$\hat{\theta}$ [rad]	De [Barra]	Para [Barra]	$x^{TCSC}$ [p.u.]	$\hat{x}^{TCSC}$ [p.u.]
3	<b>0.99028</b>	<b>0.99014</b>	<b>-0.15344</b>	<b>-0.15349</b>	3	119	0.04263	0.04265
12	0.99000	0.98990	-0.40390	-0.40405	25	120	<b>0.03575</b>	<b>0.03576</b>
24	0.99200	0.99191	-0.77140	-0.77164	24	121	<b>0.07735</b>	<b>0.07733</b>
25	<b>1.05000</b>	<b>1.04994</b>	-0.50859	-0.50880				
27	0.96800	0.96792	-0.73641	-0.73664				
70	0.98400	0.98390	<b>-1.07628</b>	<b>-1.07659</b>				
119	0.99770	0.99760	-0.20398	-0.20406				
120	1.04090	1.04082	-0.54852	-0.54874				
121	0.98816	0.98807	-0.81892	-0.81915				

FONTE: O autor (2020).

Os resultados apresentados na TABELA 38 demonstram que mesmo considerando a presença de três *TCSCs*, a partir de um conjunto de medidas contaminadas por ruído normal, o *TCSC-SE* é capaz de estimar os ângulos e módulos de tensão nas barras em conjunto com as reatâncias equivalentes dos controladores com boa precisão. O mesmo ocorre com as barras de conexão associadas aos *TCSCs*, apresentados nas três últimas linhas na TABELA 38. Os números de meias-iterações e respectivos tempos decorridos até a obtenção da solução convergida via *FCDR* para sistemas com *TCSC* e via *TCSC-SE*, para o caso Indutivo 1 do sistema *IEEE* 118 barras, são apresentados na TABELA 39.

TABELA 39 - NÚMERO DE ITERAÇÕES E TEMPO NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DA SOLUÇÃO CONVERGIDA NO CASO INDUTIVO 1 DO SISTEMA *IEEE* 118 BARRAS

<i>FCDR TCSC</i>			<i>TCSC-SE</i>		
Meias-iterações Ativas	Meias-iterações Reativas	Tempo [s]	Meias-iterações Ativas	Meias-iterações Reativas	Tempo [s]
21	20	7.93478	8	7	8.36948

FONTE: O autor (2020).

Os resultados apresentados na TABELA 39 indicam que as características de convergência do *FCDR* para sistemas com *TCSC* não foram afetadas significativamente pela inclusão dos *TCSCs*, a princípio para o caso em que os controladores fornecem compensação indutiva moderada. Por outro lado, verifica-se um aumento de 2 meias-iterações ativas e reativas, e um acréscimo de 14,14% no tempo necessários para a convergência do *TCSC-SE* quando comparado ao caso base. O aumento no número de meias-iterações necessárias para convergência no caso Indutivo 1 reflete o aumento na complexidade do problema de *EE* causado pela inserção dos controladores, ainda que o tempo necessário para a obtenção da solução convergida não tenha sido significativamente impactado.

Os fluxos de potência ativa nos ramos controlados, calculados a partir das variáveis de estado obtidas via *FCDR* para sistemas com *TCSC* e estimadas pelo *TCSC-SE* no caso Indutivo 1 do sistema *IEEE* 118 barras são apresentados na TABELA 40. O resultado associado ao menor resíduo (em módulo) para esse caso de simulação é destacado em negrito sublinhado, enquanto que o resultado associado ao maior resíduo (em módulo) é destacado em negrito simples.

TABELA 40 - FLUXOS DE POTÊNCIA ATIVA ESTIMADOS E CALCULADOS NOS RAMOS CONTROLADOS DO CASO INDUTIVO 1 DO SISTEMA *IEEE* 118 BARRAS

$P_{flow}$	Est. [p.u.]	Calc. [p.u.]	Res.
$P_{3-119}$	<b>1.17078</b>	<b>1.17060</b>	<b>1.8499E-04</b>
$P_{119-12}$	1.17069	1.17060	8.6500E-05
$P_{25-120}$	1.22007	1.22020	-1.2577E-04
$P_{120-27}$	1.22010	1.22020	-1.0010E-04
$P_{24-121}$	<b><u>0.60190</u></b>	<b><u>0.60190</u></b>	<b><u>1.1083E-06</u></b>
$P_{121-70}$	0.60197	0.60190	6.6300E-05



FONTE: O autor (2020).

Os resultados apresentados na TABELA 40 permitem verificar que quando os TCSCs inseridos no sistema operam com reatâncias equivalentes iguais aos valores calculados via *FCDR* para sistemas com TCSC ou estimados via *TCSC-SE* para o caso Indutivo 1, os fluxos de potência ativa nos ramos críticos se mantêm dentro dos valores especificados para o referido caso de simulação. Assim, o *TCSC-SE* foi capaz de estimar as variáveis de estado do sistema com precisão para a condição operativa especificada. Com intuito de verificar a aplicabilidade do *TCSC-SE* para um caso mais extremo, onde os controladores fornecem compensação indutiva com maior intensidade, é realizada a simulação para o caso Indutivo 2, cujos resultados são apresentados na TABELA 41. As melhores estimativas obtidas são destacadas em **negrito sublinhado**, enquanto que as mais distantes dos valores calculados são destacadas em **negrito simples**.

TABELA 41 - RESULTADOS PARA AS REATÂNCIAS EQUIVALENTES DOS TCSCS, BARRAS TERMINAIS E BARRAS ADICIONAIS ASSOCIADAS AOS CONTROLADORES NO CASO INDUTIVO 2 DO SISTEMA *IEEE* 118 BARRAS

Barra	V [p.u.]	$\hat{V}$ [p.u.]	$\theta$ [rad]	$\hat{\theta}$ [rad]	De [Barra]	Para [Barra]	$x^{TCSC}$ [p.u.]	$\hat{x}^{TCSC}$ [p.u.]
3	<b>0.98961</b>	<b>0.98956</b>	<b>-0.15228</b>	<b>-0.15232</b>	3	119	<b>0.06131</b>	<b>0.06132</b>
12	0.99000	0.98997	-0.40919	-0.40928	25	120	0.05671	0.05671
24	0.99200	0.99197	-0.77304	-0.77317	24	121	<b>0.11892</b>	<b>0.11895</b>
25	<b>1.05000</b>	<b>1.05000</b>	-0.50855	-0.50868				
27	0.96800	0.96799	-0.74705	-0.74718				
70	0.98400	0.98401	-1.08530	-1.08541				
119	0.99892	0.99890	-0.22091	-0.22099				
120	1.03644	1.03641	-0.56864	-0.56877				
121	0.98681	0.98680	<b>-0.84216</b>	<b>-0.84230</b>				

FONTE: O autor (2020).

A análise dos resultados apresentados na TABELA 41 indica que o *TCSC-SE* foi capaz de estimar as variáveis de estado com boa precisão no caso em que os controladores do sistema fornecem forte compensação indutiva, reduzindo em 20% o fluxo de potência ativa nos ramos críticos. Os resultados completos obtidos para esse caso de simulação são apresentados no APÊNDICE – C. O número de meias-iterações e o tempo necessário para obtenção dos resultados do caso Indutivo 2 do sistema *IEEE* 118 barras são apresentados na TABELA 42.

TABELA 42 - NÚMERO DE ITERAÇÕES E TEMPO NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DA SOLUÇÃO CONVERGIDA NO CASO INDUTIVO 2 DO SISTEMA IEEE 118 BARRAS

<i>FCDR TCSC</i>			<i>TCSC-SE</i>		
Meias-iterações Ativas	Meias-iterações Reativas	Tempo [s]	Meias-iterações Ativas	Meias-iterações Reativas	Tempo [s]
21	20	5.81037	8	7	7.86119

FONTE: O autor (2020).

Conforme os resultados apresentados na TABELA 42, verifica-se que especificar fluxos de potência significativamente inferiores aos obtidos para o caso base não altera as características de convergência do *FCDR* para sistemas com *TCSC*, ainda que o tempo de simulação tenha sofrido um pequeno decréscimo quando comparado ao caso Indutivo 1. De fato, a análise dos resultados obtidos via *FCDR* para sistemas com *TCSC* nos cenários de simulação indutivos indica que as características de convergência do método não foram afetadas pela presença de controladores operando na região indutiva.

Por outro lado, ao comparar os resultados apresentados na TABELA 42 com os resultados obtidos para o caso Indutivo 1, verifica-se certa melhora nas características de convergência do *TCSC-SE*, com o tempo computacional reduzido em 6%, ainda que o número de meias-iterações necessárias para a obtenção da solução convergida tenha se mantido. Não obstante, o aumento na complexidade do problema de *EE* causado pela presença dos controladores se mantém evidente quando os resultados dos casos indutivos são comparados aos do caso base.

Com intuito de verificar se os valores calculados e estimados para as reatâncias equivalentes dos *TCSCs* são adequados para manter os fluxos de potência ativa nos ramos críticos nos valores especificados para os mesmos, os fluxos de potência ativa estimados e calculados no caso Indutivo 2 do sistema *IEEE* 118 barras são apresentados na TABELA 43. O resultado associado ao menor resíduo (em módulo) para esse caso de simulação é destacado em **negrito sublinhado**, enquanto que o resultado associado ao maior resíduo (em módulo) é destacado em **negrito simples**.

TABELA 43 - FLUXOS DE POTÊNCIA ATIVA ESTIMADOS E CALCULADOS NOS RAMOS CONTROLADOS DO CASO INDUTIVO 2 DO SISTEMA *IEEE* 118 BARRAS

$P_{flow}$	Est. [p.u.]	Calc. [p.u.]	Res.
$P_{3-119}$	<b>1.10598</b>	<b>1.10560</b>	<b>3.7817E-04</b>
$P_{119-12}$	1.10564	1.10560	3.5946E-05
$P_{25-120}$	1.15233	1.15240	6.9521E-05
$P_{120-27}$	<b><u>1.15237</u></b>	<b><u>1.15240</u></b>	<b><u>2.9506E-05</u></b>
$P_{24-121}$	0.56845	0.56850	5.0197E-05
$P_{121-70}$	0.56843	0.56850	7.2455E-05

FONTE: O autor (2020).

Os resultados apresentados na TABELA 43 permitem verificar que os fluxos de potência nos ramos dos *TCSCs* e nas linhas de transmissão controladas se mantêm nos valores especificados no caso Indutivo 2, em função das reatâncias equivalentes calculadas via *FCDR* para sistemas com *TCSC* e estimadas via *TCSC-SE*. De maneira geral, os resultados obtidos para os dois casos de simulação indutivos indicam que o método proposto obteve desempenho satisfatório e que possui boa aplicabilidade para sistemas de transmissão de maior porte nos casos em que os *TCSCs* presentes no sistema operam na região indutiva.

Para verificar a aplicabilidade do método proposto para os casos em que os controladores operam na região capacitiva, procede-se com as simulações para o caso Capacitivo 1 e caso Capacitivo 2. Os resultados obtidos para as reatâncias equivalentes dos *TCSCs* e variáveis de estado tradicionais das barras terminais e barras adicionais associadas aos controladores no caso Capacitivo 1 são apresentados na TABELA 44. As melhores estimativas obtidas são destacadas em negrito sublinhado, enquanto que as mais distantes dos valores calculados são destacadas em negrito simples. Os resultados completos obtidos para esse caso de simulação estão dispostos no APÊNDICE – C.

TABELA 44 - RESULTADOS PARA AS REATÂNCIAS EQUIVALENTES DOS TCSCS, BARRAS TERMINAIS E BARRAS ADICIONAIS ASSOCIADAS AOS CONTROLADORES NO CASO CAPACITIVO 1 DO SISTEMA *IEEE* 118 BARRAS

Barra	V [p.u.]	$\hat{V}$ [p.u.]	$\theta$ [rad]	$\hat{\theta}$ [rad]	De [Barra]	Para [Barra]	$x^{TCSC}$ [p.u.]	$\hat{x}^{TCSC}$ [p.u.]
3	0.99394	0.99416	-0.15868	-0.15859	3	119	<b>-0.01586</b>	<b>-0.01580</b>
12	0.99000	0.99014	-0.38416	-0.38398	25	120	-0.02926	-0.02924
24	0.99200	0.99212	-0.76686	-0.76655	24	121	<b>-0.05168</b>	<b>-0.05168</b>
25	1.05000	1.05010	-0.51058	-0.51034				
27	0.96800	0.96810	-0.69609	-0.69582				
70	0.98400	0.98413	<b>-1.04208</b>	<b>-1.04171</b>				
119	<b>0.98937</b>	<b>0.98966</b>	<b>-0.13560</b>	<b>-0.13563</b>				
120	<b>1.05915</b>	<b>1.05925</b>	-0.47133	-0.47112				
121	0.99597	0.99610	-0.72837	-0.72806				

FONTE: O autor (2020).

Os resultados apresentados na TABELA 44 permitem verificar que o *TCSC-SE* é capaz de estimar as variáveis de estado do sistema *IEEE* 118 barras com boa precisão, considerando o caso em que os três *TCSCs* presentes no sistema operam na região capacitiva, elevando moderadamente a capacidade de transmissão das linhas controladas. O número de meias-iterações e o tempo necessário para obtenção dos resultados do caso Capacitivo 1 do sistema *IEEE* 118 barras são apresentados na TABELA 45.

TABELA 45 - NÚMERO DE ITERAÇÕES E TEMPO NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DA SOLUÇÃO CONVERGIDA NO CASO CAPACITIVO 1 DO SISTEMA *IEEE* 118 BARRAS

<i>FCDR TCSC</i>			<i>TCSC-SE</i>		
Meias-iterações Ativas	Meias-iterações Reativas	Tempo [s]	Meias-iterações Ativas	Meias-iterações Reativas	Tempo [s]
19	20	7.95823	13	12	9.59358

FONTE: O autor (2020).

A análise dos resultados apresentados na TABELA 45 permite verificar que para o caso em que os *TCSCs* operam na região capacitiva, a característica de convergência do *TCSC-SE* é afetada, se comparada ao caso base ou aos casos indutivos, enquanto que a característica de convergência do *FCDR* para sistemas com *TCSC* não sofre grandes alterações. O impacto no *TCSC-SE* se evidencia pelo

aumento de 5 meias-iterações ativas e 5 meias-iterações reativas, e o incremento de 14,6% no tempo computacional se comparado ao caso Indutivo 1. Isso pode ser justificado pois, ao operar na região capacitiva, o *TCSC* reduz (em módulo) a reatância equivalente do ramo em que está inserido, reduzindo também sua relação  $X/R$ . Isso acaba por afetar a característica de convergência do *TCSC-SE*, que está sujeito às limitações inerentes aos métodos desacoplados.

Com base nos resultados apresentados na TABELA 44, a fim de verificar se o controle fornecido pelos *TCSCs* é suficiente para atender às condições operativas especificadas para o caso Capacitivo 1, os fluxos de potência ativa estimados e calculados nos ramos controlados são apresentados na TABELA 46. O resultado associado ao menor resíduo (em módulo) para esse caso de simulação é destacado em negrito sublinhado, enquanto que o resultado associado ao maior resíduo (em módulo) é destacado em negrito simples.

TABELA 46 - FLUXOS DE POTÊNCIA ATIVA ESTIMADOS E CALCULADOS NOS RAMOS CONTROLADOS DO CASO CAPACITIVO 1 DO SISTEMA *IEEE* 118 BARRAS

$P_{flow}$	Est. [p.u.]	Calc. [p.u.]	Res.
$P_{3-119}$	<b>1.43027</b>	<b>1.43080</b>	<b>5.3070E-04</b>
$P_{119-12}$	1.43047	1.43080	3.2578E-04
$P_{25-120}$	1.49140	1.49146	5.5207E-05
$P_{120-27}$	1.49136	1.49146	1.0391E-04
$P_{24-121}$	<b><u>0.73573</u></b>	<b><u>0.73570</u></b>	<b><u>2.5579E-05</u></b>
$P_{121-70}$	0.73574	0.73570	3.6274E-05

FONTE: O autor (2020).

Os resultados apresentados na TABELA 46 permitem verificar que as reatâncias equivalentes dos controladores estimadas pelo *TCSC-SE* são adequadas para atender a condição de operação especificada no caso Capacitivo 1, onde os *TCSCs* operam para elevar em 10% a capacidade de transmissão das linhas controladas. A fim de verificar a aplicabilidade do *TCSC-SE* para um caso de compensação capacitiva ainda maior, é realizada a simulação para o caso Capacitivo 2, em que os controladores devem elevar a capacidade de transmissão das linhas controladas em 20%.

Os resultados obtidos para as reatâncias equivalentes dos *TCSCs* e variáveis de estado tradicionais das barras terminais e barras adicionais associadas aos

controladores no caso Capacitivo 2 são apresentados na TABELA 47. As melhores estimativas obtidas são destacadas em negrito sublinhado, enquanto as mais distantes dos valores calculados são destacadas em negrito simples. Os resultados completos obtidos para esse caso de simulação estão dispostos no APÊNDICE – C.

TABELA 47 - RESULTADOS PARA AS REATÂNCIAS EQUIVALENTES DOS TCSCS, BARRAS TERMINAIS E BARRAS ADICIONAIS ASSOCIADAS AOS CONTROLADORES NO CASO CAPACITIVO 2 DO SISTEMA *IEEE* 118 BARRAS

Barra	V [p.u.]	$\hat{V}$ [p.u.]	$\theta$ [rad]	$\hat{\theta}$ [rad]	De [Barra]	Para [Barra]	$x^{TCSC}$ [p.u.]	$\hat{x}^{TCSC}$ [p.u.]
3	0.99514	0.99539	<b><u>-0.16014</u></b>	<b><u>-0.16008</u></b>	3	119	<b><u>-0.02752</u></b>	<b><u>-0.02741</u></b>
12	0.99000	0.99017	-0.37959	-0.37946	25	120	<b><u>-0.04203</u></b>	<b><u>-0.04204</u></b>
24	0.99200	0.99215	-0.76622	-0.76596	24	121	-0.07697	-0.07696
25	1.05000	1.05014	-0.51153	-0.51136				
27	0.96800	0.96815	-0.68658	-0.68634				
70	0.98400	0.98416	-1.03401	-1.03367				
119	<b><u>0.98622</u></b>	<b><u>0.98659</u></b>	-0.11819	-0.11832				
120	1.06369	1.06383	-0.45282	-0.45265				
121	<b><u>0.99849</u></b>	<b><u>0.99863</u></b>	<b><u>-0.70642</u></b>	<b><u>-0.70619</u></b>				

FONTE: O autor (2020).

A comparação numérica entre os resultados calculados e estimados apresentados na TABELA 47 permite verificar que o *TCSC-SE* foi capaz de retornar uma estimativa precisa para as variáveis de estado do sistema *IEEE* 118 barras no caso em que os controladores operam fornecendo forte compensação série capacitiva. O número de meias-iterações e o tempo necessário para obtenção dos resultados do caso Capacitivo 2 são apresentados na TABELA 48.

TABELA 48 - NÚMERO DE ITERAÇÕES E TEMPO NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DA SOLUÇÃO CONVERGIDA NO CASO CAPACITIVO 2 DO SISTEMA *IEEE* 118 BARRAS

<i>FCDR TCSC</i>			<i>TCSC-SE</i>		
Meias-iterações Ativas	Meias-iterações Reativas	Tempo [s]	Meias-iterações Ativas	Meias-iterações Reativas	Tempo [s]
19	19	5.94796	13	12	9.28906

FONTE: O autor (2020).

A partir dos resultados apresentados na TABELA 48, pode-se verificar que para o caso Capacitivo 2 o *FCDR* para sistemas com *TCSC* obteve o melhor

desempenho entre todas as simulações realizadas com o sistema *IEEE* 118 barras, se aproximando inclusive do caso base, onde não há controladores no sistema. Em contrapartida, o *TCSC-SE* apresentou pequena melhora de desempenho quando comparado ao caso Capacitivo 1, mantendo o número de meias-iterações, com um pequeno decréscimo no tempo computacional necessário para a obtenção da solução convergida. Apesar disso, o impacto nas características de convergência do *TCSC-SE* para os casos em que os controladores operam no modo capacitivo ainda é significativo e bem evidente.

Por fim, os fluxos de potência ativa estimados e calculados nos ramos controlados para o caso Capacitivo 2 do sistema *IEEE* 118 barras são apresentados na TABELA 49. O resultado associado ao menor resíduo (em módulo) para esse caso de simulação é destacado em negrito sublinhado, enquanto que o resultado associado ao maior resíduo (em módulo) é destacado em negrito simples.

TABELA 49 - FLUXOS DE POTÊNCIA ATIVA ESTIMADOS E CALCULADOS NOS RAMOS CONTROLADOS DO CASO CAPACITIVO 2 DO SISTEMA *IEEE* 118 BARRAS

$P_{flow}$	Est. [p.u.]	Calc. [p.u.]	Res.
$P_{3-119}$	1.49578	<b>1.49580</b>	1.9308E-05
$P_{119-12}$	<b>1.49545</b>	<b>1.49580</b>	<b>3.4977E-04</b>
$P_{25-120}$	1.55931	1.55920	1.1159E-04
$P_{120-27}$	1.55921	1.55920	1.3628E-05
$P_{24-121}$	<u><b>0.76909</b></u>	<u><b>0.76910</b></u>	<u><b>8.1963E-06</b></u>
$P_{121-70}$	0.76908	0.76910	1.7368E-05

FONTE: O autor (2020).

A análise dos resultados apresentados na TABELA 49 permite concluir que as reatâncias equivalentes dos controladores, estimadas pelo *TCSC-SE* no caso Capacitivo 2 do sistema *IEEE* 118 barras, são adequadas para manter os fluxos de potência ativa nos ramos controlados dentro dos valores especificados para esse caso de simulação. Os resultados obtidos para os casos de simulação em que os controladores presentes no sistema operam de forma a maximizar a capacidade de transmissão dos ramos controlados apontam para uma boa aplicabilidade do método, ainda que sob tais condições operativas suas características de convergência sejam afetadas negativamente.

### 5.3 DISCUSSÃO ACERCA DOS RESULTADOS

Conclusões obtidas da análise dos resultados apresentados nas Seções 5.1 e 5.2 são apresentados à seguir. Discute-se ainda sobre as contribuições, aplicações e limitações das metodologias propostas.

Apesar de se tratar de uma ferramenta cuja formulação leva em consideração algumas aproximações e simplificações matemáticas, o *TCSC-LSE* se constitui de um passo inicial no desenvolvimento do *TCSC-SE*. Não obstante, os resultados obtidos com o *TCSC-LSE* podem ser utilizados como valores iniciais para as variáveis de estado em ferramentas iterativas capazes de processar sistemas de transmissão com *TCSCs*. Os testes conduzidos com o *TCSC-LSE* no sistema *IEEE* 14 barras demonstram que as estimativas para as variáveis de estado do modelo linearizado do sistema são obtidas com bons níveis de precisão, o que corrobora com a eficiência do *TCSC-LSE* e reforça sua aplicabilidade como etapa inicial na determinação das condições iniciais em ferramentas iterativas.

Quanto ao *TCSC-SE*, os resultados obtidos para o sistema *IEEE* 30 barras indicam que as características de convergência do método não sofreram alterações significativas, mesmo com dois controladores presentes no sistema. Os resultados demonstram também que, além de ser capaz de estimar as variáveis de estado tradicionais e a reatância equivalente dos controladores a partir do conjunto de medidas, o *TCSC-SE* também pode ser utilizado para determinar o valor de reatância equivalente do *TCSC* necessária para que seja mantido o fluxo de potência desejado em um ramo controlado.

Além disso, as variáveis de estado associadas às barras adicionais de conexão dos controladores, estimadas pelo *TCSC-SE*, fornecem informações relevantes ao operador sem que sejam necessários cálculos adicionais após a obtenção de uma solução convergida para o problema de *EE*. Tais informações são úteis para que seja verificada a queda de tensão provocada pelo dispositivo, bem como o nível de compensação reativa fornecida pelo mesmo, por exemplo.

Os testes conduzidos com o *TCSC-SE* permitem ainda verificar que suas características de convergência são fortemente influenciadas pela relação  $X/R$  dos ramos do sistema, assim, sua aplicação está limitada aos sistemas de transmissão. Essa limitação fica evidente nos casos de simulação capacitivos do sistema *IEEE* 118 barras, onde as características de convergência do *TCSC-SE* sofreram impacto



significativo decorrente da diminuição da relação  $X/R$  nos ramos controlados, causada pela compensação série capacitiva fornecida pelos *TCSCs*. Tal limitação pode ser superada com auxílio da normalização por unidade complexa, que, a partir do ajuste do ângulo base apropriado, possibilita artificialmente controlar as relações  $X/R$  dos ramos do sistema.

Verificou-se também que a inicialização das variáveis afeta diretamente as características de convergência do *TCSC-SE*, de forma que ajustes nos valores iniciais das reatâncias equivalentes dos controladores podem acelerar a convergência do método. De maneira geral, o valor inicial escolhido para a reatância equivalente de um *TCSC* deve corresponder a um valor factível, ou seja, deve obedecer aos limites físicos de compensação provida por esses dispositivos. Assim, em função das características físicas do ramo controlado, utilizar a metade da sua reatância como valor inicial para a reatância equivalente do *TCSC* que o controla pode resultar em problemas de convergência. A implementação de uma etapa inicial ao *TCSC-SE*, que permita identificar uma melhor aproximação para as reatâncias equivalentes dos controladores respeitando suas características operacionais, pode evitar problemas relacionados à inicialização das variáveis. Conforme discutido ao início dessa Seção, o *TCSC-LSE* pode ser utilizado nesse sentido, porém investigações sobre sua utilização na inicialização das variáveis de estado do *TCSC-SE* não são contempladas no presente trabalho.

O ganho computacional inerente à formulação *EE-DR* diz respeito ao cálculo da matriz ganho. Nesse sentido, as aproximações inseridas no cálculo da matriz ganho do *TCSC-SE* não afetam a precisão do método, ainda que possa impactar o número de iterações necessárias para a obtenção da solução convergida. Apesar disso, por se constituir de uma modificação da formulação *EE-DR* tradicional, o *TCSC-SE* se apresenta como uma alternativa mais interessante que a formulação *MQP* convencional no que diz respeito à eficiência computacional, ainda que a matriz ganho seja recalculada a cada iteração. Com intuito de aproximar ainda mais a formulação do *TCSC-SE* da formulação *EE-DR* tradicional, pode-se incorporar à formulação do problema técnicas que permitam atualizar a cada iteração apenas os elementos de  $\mathbf{G}_{AA}$  e  $\mathbf{G}_{RR}$  sensíveis às modificações em  $\mathbf{x}^{TCSC}$ , de forma que tais matrizes não sejam recalculadas a cada iteração. Tal modificação pode resultar em uma melhoria significativa na eficiência computacional do método.

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Os estimadores de estado tradicionalmente presentes em grande parte dos centros de controle e operação ao redor do mundo são, em grande maioria, baseados no método de mínimos quadrados ponderados, uma abordagem capaz de obter resultados precisos, porém com custo e tempo computacionais elevados. A partir de uma série de aproximações desenvolveu-se a formulação desacoplado-rápido dos estimadores de estado baseados no método de mínimos quadrados ponderados, o que possibilitou a redução de custo e tempo computacional do processo de estimação, preservando sua precisão e possibilitando aplicações em tempo real. Apesar das vantagens apresentadas pela formulação desacoplado-rápido do problema de estimação de estado, há na literatura científica uma lacuna referente à inserção de controladores *FACTS* em tal formulação.

O presente trabalho de pesquisa propõe o desenvolvimento de um algoritmo de estimação de estado baseado na formulação de mínimos quadrados ponderados desacoplado-rápido, capaz de processar sistemas de transmissão com o controlador *FACTS TCSC*. Para tanto, a reatância equivalente do dispositivo, inserida como uma nova variável de estado para o problema de estimação de estados, é estimada juntamente com as variáveis de estado tradicionais do sistema.

Com intuito de adquirir a base de conhecimento necessária para o desenvolvimento da proposta central do presente trabalho de pesquisa, conduz-se uma revisão da literatura que aborda o problema de *EE* e os principais tópicos relacionados aos controladores *FACTS*. O portfólio bibliográfico é composto por artigos científicos publicados em periódicos, conferências e congressos, reunido a partir de buscas na base de dados do *IEEE Xplore* e do portal de periódicos da *CAPES*.

Atendendo aos objetivos específicos I e II, o desenvolvimento do presente trabalho de pesquisa se inicia com a concepção de um estimador de estado linearizado para sistemas de transmissão com *TCSCs*, designado por *TCSC-LSE*. O trabalho desenvolvido com o *TCSC-LSE*, apresentado na Seção 4.1, foi publicado na forma de artigo científico, apresentado em 16 de Setembro de 2019 no *IEEE Innovative Smart Grid Technologies Latin America 2019*, realizado na cidade de Gramado – Rio Grande do Sul.

O *TCSC-LSE* é desenvolvido tendo em vista a principal função desempenhada pelo *TCSC*, que concerne ao controle do fluxo de potência ativa no ramo em que o dispositivo é inserido. Nesse sentido, a partir de um conjunto de medidas de fluxo e injeção de potência ativa, o *TCSC-LSE* é capaz de estimar as reatâncias equivalentes dos controladores em conjunto com os ângulos das tensões nas barras, considerando o modelo linearizado da rede. Além disso, o *TCSC-LSE* possui aplicações na determinação da reatância equivalente necessária para que sejam mantidos os fluxos de potência ativa desejados nas linhas controladas. A metodologia desenvolvida no *TCSC-LSE* não impõe um número máximo de controladores presentes no sistema, e permite avaliar, de maneira simplificada, como os *TCSCs* atuam no controle dos fluxos de potência ativa.

Atendendo ao objetivo geral e aos objetivos específicos III e IV do presente trabalho de pesquisa, que dizem respeito ao desenvolvimento de um estimador de estado baseado na formulação desacoplado-rápido do método de mínimos quadrados ponderados, capaz de processar sistemas de transmissão com o controlador *FACTS TCSC*, desenvolve-se o algoritmo designado por *TCSC-SE*.

As características operacionais e funcionais do *TCSC* favorecem o desacoplamento do problema de *EE*, assim, a reatância equivalente do *TCSC* é inserida como uma variável de estado no subproblema ativo da formulação desacoplado-rápido do problema de *EE*, cujos valores são atualizados em conjunto com os ângulos das tensões nas barras a cada meia-iteração ativa. Os testes do *TCSC-SE*, conduzidos em três sistemas-teste com portes e características distintas, demonstram a eficiência e precisão do método. Em todos os casos simulados, o algoritmo foi capaz de estimar com grande precisão as magnitudes e ângulos das tensões nas barras, assim como as reatâncias equivalentes dos controladores sob diferentes condições operativas.

As aproximações inseridas no cálculo da matriz ganho do *TCSC-SE* não comprometem a precisão do método, porém podem desacelerar sua convergência. De qualquer forma, no que tange à eficiência computacional, a formulação *EE-DR* é mais interessante que a formulação *MQP* tradicional, o que reforça a aplicabilidade do *TCSC-SE*. Por se tratar de um método baseado na formulação desacoplado-rápido do problema de *EE*, o *TCSC-SE* está sujeito às mesmas limitações do estimador de estado desacoplado-rápido tradicional, cuja aplicabilidade se restringe aos sistemas de transmissão.

Em trabalhos futuros deseja-se modelar outros controladores *FACTS* para que sejam inseridos na formulação *EE-DR*. Como extensão dessa proposição inicial está o desenvolvimento de uma abordagem capaz de processar o modelo trifásico da rede, bem como uma abordagem para o problema de *EE* para sistemas de distribuição com controladores *D-FACTS*. Vislumbra-se ainda a possibilidade de expandir a aplicação do *TCSC-SE* para uma abordagem unificada, que permita processar sistemas *T&D*.

## REFERÊNCIAS

- ABUR, A.; EXPÓSITO, A. G. **Power System State Estimation: Theory and Implementation**. 1st. ed. Boca Raton: CRC Press, 2004. Disponível em: <<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Power+System+State+Estimation+Theory+and+Implementation#0%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Power+system+state+estimation:+theory+and+implementation#0>>
- ACHA, E. et al. **FACTS: modelling and simulation in power networks**, Wiley-Blackwell, New York. New York.
- ALBERTINI, M. R. M. C. **Metodologia Para Depuração Off-line de Parâmetros Série e Shunt de Linhas de Transmissão Através de Diversas Amostras de Medidas**. 2010. Universidade de São Paulo, [s. l.], 2010.
- ALVARADO, F. L.; TINNEY, W. F. State estimation using augmented blocked matrices. **IEEE Transactions on Power Systems**, [s. l.], v. 5, n. 3, p. 911–921, 1990. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/65921/>>. Acesso em: 10 maio. 2019.
- BARTOLOMEY, P. I. et al. New information technologies for state estimation of power systems with FACTS. **IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe**, [s. l.], p. 1–8, 2012.
- CHITSAZAN, M. A.; FADALI, M. S.; TRZYNADLOWSKI, A. M. State estimation of IEEE 14 bus with unified interphase power controller (UIPC) using WLS method. **2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2017**, [s. l.], v. 2017-Janua, p. 2903–2908, 2017.
- CHITSAZAN, M. A.; FADALI, M. S.; TRZYNADLOWSKI, A. M. State Estimation for Large-Scale Power Systems and FACTS Devices Based on Spanning Tree Maximum Exponential Absolute Value. **IEEE Transactions on Power Systems**, [s. l.], v. 35, n. 1, p. 238–248, 2020.
- CHRISTIE, R. D. **Power System Test Case Archive**. 1999. Disponível em:

<<https://labs.ece.uw.edu/pstca/>>.

COELHO, C. S. S.; PORTELINHA, R. K.; LOURENÇO, E. M. Gerador de medidas trifásico para estudos de estimação de estados em sistemas de distribuição emergentes. In: IEEE INDUSCON 2016 2016, Curitiba. **Anais...** Curitiba: IEEE Induscon 2016, 2016.

DE LIMA, L. F. G. S.; LOURENÇO, E. M.; TORTELLI, O. L. State Estimation of Power Systems With TCSCs Using the Linearized WLS Algorithm. In: 2019 IEEE PES INNOVATIVE SMART GRID TECHNOLOGIES CONFERENCE - LATIN AMERICA (ISGT LATIN AMERICA) 2019, **Anais...** : IEEE, 2019. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8895436/>>. Acesso em: 26 nov. 2019.

EDRIS, A. A. et al. Proposed terms and definitions for Flexible AC Transmission System (FACTS). **IEEE Transactions on Power Delivery**, [s. l.], v. 12, n. 4, p. 1848–1853, 1997.

EXPÓSITO, A. G.; CONEJO, A. J.; CAÑIZARES, C. **Sistemas de Energia Elétrica: Análise e Operação**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

FREUND, R. S. **Implantação da Função de Estimação de Estado em um Sistema de Gerenciamento de Energia**. 2006. Universidade Federal Fluminense, [s. l.], 2006.

GOMATHI, V.; RAMACHANDRAN, V.; KUMAR, C. V. Simulation and state estimation of power system with Interline Power flow Controller. In: 45TH INTERNATIONAL UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE UPEC2010 2010, **Anais...** [s.l: s.n.]

GYUGYI, L. Power Electronics in Electric Utilities: Static Var Compensators. **Proceedings of the IEEE**, [s. l.], v. 76, n. 4, p. 483–494, 1988.

GYUGYI, L. Unified power-flow control concept for flexible AC transmission systems. **IEE Proceedings C: Generation Transmission and Distribution**, [s. l.], v. 139, n. 4, p. 323–331, 1992.

HAFFNER, S. **Modelagem e Análise de Sistemas Elétricos em Regime Permanente**, 2007.

HINGORANI, N. G. High Power Electronics and Flexible AC Transmission System. **IEEE Power Engineering Review**, [s. l.], v. 8, n. 7, p. 3–4, 1988.

HINGORANI, N. G.; GYUGYI, L.; EL-HAWARY, M. E. **Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems**. [s.l.] : Wiley-IEEE Press, 1999.

KARAMTA, M. R.; JAMNANI, J. G. A review of power system state estimation: Techniques, state-of-the-art and inclusion of FACTS controllers. **International Conference on Electrical Power and Energy Systems, ICEPES 2016**, [s. l.], p. 533–538, 2017.

KOLOSOK, I. N.; TIKHONOV, A. V. Identification of parameters of the FACTS models for power system state estimation. **2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017 - Proceedings**, [s. l.], p. 0–5, 2017.

KUMARI, M. S.; PRIYANKA, G.; SYDULU, M. Modelling of thyristor controlled series compensator in fast Decoupled Load Flow solution for power flow control. In: FIRST INTERNATIONAL POWER AND ENERGY CONFERENCE, (PECON 2006) PROCEEDINGS 2006, **Anais...** [s.l: s.n.]

LI, W.; VANFRETTI, L. A PMU-based state estimator for networks containing FACTS devices. In: 2015 IEEE EINDHOVEN POWERTECH, POWERTECH 2015 2015, **Anais...** : IEEE, 2015. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7232725/>>. Acesso em: 13 mar. 2019.

MARTÍNEZ-PARRALES, R.; FUERTE-ESQUIVEL, C. R. A new unified approach for the state estimation and bad data analysis of electric power transmission systems with multi-terminal VSC-based HVDC networks. **Electric Power Systems Research**, [s. l.], v. 160, p. 251–260, 2018.

MONTICELLI, A. **State Estimation in Electric Power Systems : a Generalized Approach**. 1st. ed. New York: Springer, 1999.

MONTICELLI, A.; GARCIA, A. Fast decoupled state estimators. **IEEE Transactions on Power Systems**, [s. l.], v. 5, n. 2, p. 556–564, 1990. a. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/document/54566/>>. Acesso em: 15 abr. 2019.

MONTICELLI, A.; GARCIA, A. Fast Decoupled State Estimators. **IEEE Transactions on Power Systems**, [s. l.], v. 5, n. 2, p. 556–564, 1990. b. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/54566/>>. Acesso em: 13 mar. 2019.

MONTICELLI, A. J. **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1983.

NOR, N. M.; JEGATHEESAN, R. State estimation using constructed Jacobian (SECJ) embedded with UPFC. **2010 International Conference on Intelligent and Advanced Systems, ICIAS 2010**, [s. l.], 2010.

OKON, T.; WILKOSZ, K. Consideration of different operation modes of UPFC in power system state estimation. **2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering, IEEEIC.EU 2011 - Conference Proceedings**, [s. l.], p. 2–5, 2011.

PHADKE, A. G.; THORP, J. S. Synchronized Phasor Measurements and their Applications. **Springer**, [s. l.], p. 246, 2008. Disponível em: <<http://www.springer.com/engineering/energy+technology/book/978-0-387-76535-8>>. Acesso em: 29 jun. 2020.

PORTELINHA, R. K. **Fluxo de Potência T&D Unificado com Representação de Dispositivos de Controle e Ramos Chaveáveis**. Curitiba.

PRESADA, V. I. et al. State estimation in power systems with FACTS devices and PMU measurements. **Proceedings of the Universities Power Engineering Conference**, [s. l.], 2014.

RAKPENTHAI, C. et al. An interior point method for WLAV state estimation of power system with UPFCs. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, [s. l.], v. 32, n. 6, p. 671–677, 2010.

ROY, L.; MOHAMMED, T. A. Fast super decoupled state estimator for power systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, [s. l.], v. 12, n. 4, p. 1597–1603, 1997.

RUBIO-MARROQUÍN, G. O.; FUERTE-ESQUIVEL, C. R.; ZAMORA-CÁRDENAS, E.



A. Impact of bad data injection attacks in the estimation of FACTS controllers parameters. In: 2018 IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY INNOVATIVE SMART GRID TECHNOLOGIES CONFERENCE, ISGT 2018 2018, **Anais...** : IEEE, 2018. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8403358/>>. Acesso em: 13 mar. 2019.

SCHWEPPE, F. Power System Static-State Estimation, Part III: Implementation. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, [s. l.], v. PAS-89, n. 1, p. 130–135, 1970. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4074024/>>. Acesso em: 2 maio. 2019.

SCHWEPPE, F.; ROM, D. Power System Static-State Estimation, Part II: Approximate Model. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, [s. l.], v. PAS-89, n. 1, p. 125–130, 1970. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4074023/>>. Acesso em: 2 maio. 2019.

SCHWEPPE, F.; WILDES, J. Power System Static-State Estimation, Part I: Exact Model. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, [s. l.], v. PAS-89, n. 1, p. 120–125, 1970. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4074022/>>. Acesso em: 2 maio. 2019.

TATSUNO, M.; EJIMA, Y.; IWAMOTO, S. Convergence improvement and bad data detection for fast-decoupled state estimator using optimal multiplier. In: 2006 IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY GENERAL MEETING 2008, **Anais...** : IEEE, 2008. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1709040/>>. Acesso em: 13 mar. 2019.

TORTELLI, O. L. **Alocação e Operação de Controladores FACTS em Sistemas Elétricos de Potência**. 2010. Univerdsidade Estadual de Campinas, [s. l.], 2010.

VENKATESWARAN, V. B.; MANOJ, V. State estimation of power system containing FACTS Controller and PMU. In: PROCEEDINGS OF 2015 IEEE 9TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT SYSTEMS AND CONTROL, ISCO 2015 2015, **Anais...** : IEEE, 2015. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7282281/>>. Acesso em: 13 mar. 2019.

XU, B.; ABUR, A. State estimation of systems with embedded FACTS devices. **2003**

**IEEE Bologna PowerTech - Conference Proceedings**, [s. l.], v. 1, p. 128–132, 2003.

XU, B.; ABUR, A. State estimation of systems with UPFCs using the interior point method. **IEEE Transactions on Power Systems**, [s. l.], v. 19, n. 3, p. 1635–1641, 2004. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1318703/>>. Acesso em: 13 mar. 2019.

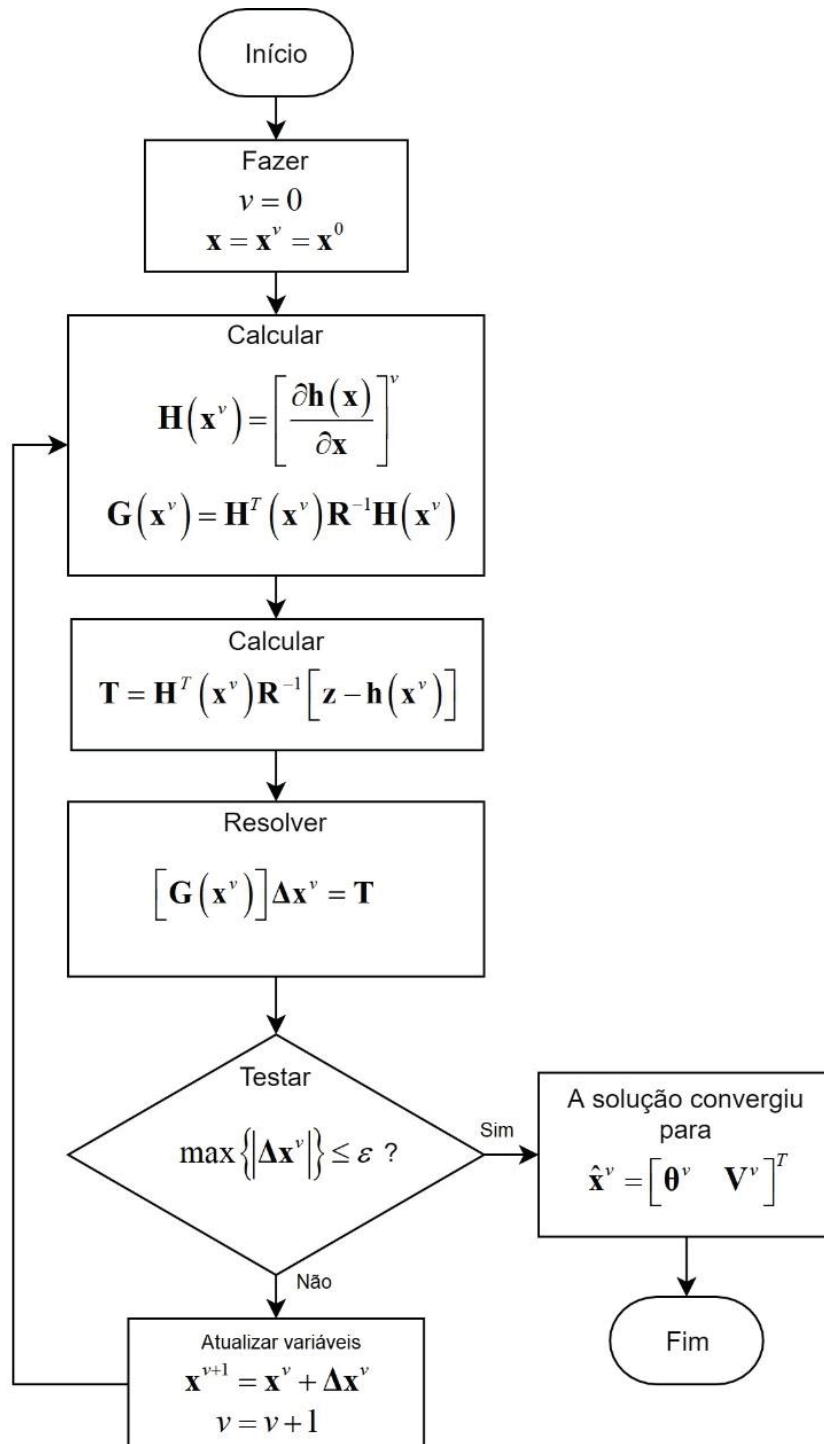
ZAMORA-CARDENAS, E. A.; FUERTE-ESQUIVEL, C. R. Static state estimation of FACTS containing synchronized phasor measurement units. **IEEE Power and Energy Society General Meeting**, [s. l.], p. 1–7, 2012.

ZIMMERMAN, R. D.; MURILLO-SANCHEZ, C. E. **MATPOWER (Version 7.0)**, 2019. Disponível em: <<https://matpower.org>>. Acesso em: 11 maio. 2020.

ZIMMERMAN, R. D.; MURILLO-SÁNCHEZ, C. E.; THOMAS, R. J. MATPOWER: Steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education. **IEEE Transactions on Power Systems**, [s. l.], v. 26, n. 1, p. 12–19, 2011.

## APÊNDICE – A

FIGURA AP.0.1 - FLUXOGRAMA DO ESTIMADOR DE ESTADO MQP



FONTE: O autor (2020).

## APÊNDICE – B

### Plano de medição definido para o sistema *IEEE 118* BARRAS

TABELA 50 - PLANO DE MEDIÇÃO ADOTADO PARA O SISTEMA *IEEE 118* BARRAS - MEDIDAS DE FLUXOS DE POTÊNCIA ATIVA E REATIVA

$P_{flow}$ e $Q_{flow}$											
# Medida	De	Para	# Medida	De	Para	# Medida	De	Para	# Medida	De	Para
1	1	2	61	36	34	121	65	38	181	91	92
2	2	1	62	34	37	122	65	64	182	92	91
3	1	3	63	38	37	123	49	66	183	92	93
4	4	5	64	37	38	124	66	49	184	92	94
5	3	5	65	37	39	125	62	66	185	93	94
6	6	5	66	40	37	126	66	62	186	94	95
7	6	7	67	30	38	127	62	67	187	80	96
8	8	9	68	38	30	128	65	66	188	82	96
9	8	5	69	40	39	129	66	65	189	94	96
10	10	9	70	40	41	130	66	67	190	80	97
11	4	11	71	40	42	131	65	68	191	80	98
12	11	4	72	42	40	132	69	47	192	80	99
13	11	5	73	42	41	133	49	69	193	99	80
14	11	12	74	43	44	134	69	49	194	92	100
15	12	11	75	34	43	135	69	68	195	100	92
16	12	2	76	44	45	136	69	70	196	100	94
17	3	12	77	46	45	137	70	69	197	95	96
18	12	3	78	46	47	138	24	70	198	96	97
19	12	7	79	46	48	139	70	24	199	100	98
20	11	13	80	49	47	140	70	71	200	99	100
21	12	14	81	42	49	141	24	72	201	100	99
22	15	13	82	49	42	142	72	24	202	100	101
23	15	14	83	49	45	143	72	71	203	92	102
24	12	16	84	49	48	144	73	71	204	101	102
25	15	17	85	49	50	145	70	74	205	100	103
26	16	17	86	49	51	146	74	70	206	103	100
27	18	17	87	51	52	147	70	75	207	100	104
28	18	19	88	52	53	148	69	75	208	104	100
29	19	18	89	54	53	149	74	75	209	103	104
30	19	20	90	49	54	150	76	77	210	104	103
31	15	19	91	54	49	151	77	76	211	103	105
32	19	15	92	54	55	152	69	77	212	105	103
33	20	21	93	55	54	153	77	69	213	100	106
34	21	22	94	54	56	154	77	75	214	104	105
35	22	23	95	56	54	155	77	78	215	105	104

36	24	23	96	55	56	156	78	77	216	105	106
37	25	23	97	56	55	157	78	79	217	105	107
38	26	25	98	56	57	158	77	80	218	107	105
39	25	26	99	50	57	159	80	77	219	105	108
40	25	27	100	56	58	160	80	79	220	107	106
41	27	25	101	51	58	161	68	81	221	108	109
42	27	28	102	54	59	162	80	81	222	103	110
43	28	29	103	59	54	163	77	82	223	110	103
44	30	17	104	56	59	164	82	77	224	110	109
45	8	30	105	59	56	165	82	83	225	110	111
46	26	30	106	55	59	166	83	84	226	111	110
47	31	17	107	69	55	167	85	83	227	110	112
48	31	29	108	59	60	168	85	84	228	112	110
49	32	23	109	60	59	169	85	86	229	113	17
50	31	32	110	59	61	170	87	86	230	32	113
51	32	31	111	61	59	171	85	88	231	113	32
52	27	32	112	60	61	172	85	89	232	32	114
53	32	27	113	61	60	173	89	85	233	27	115
54	15	33	114	60	62	174	89	88	234	114	115
55	19	34	115	62	60	175	89	90	235	116	68
56	34	19	116	61	62	176	90	89	236	12	117
57	36	35	117	62	61	177	90	91	237	75	118
58	35	37	118	59	63	178	91	90	238	76	118
59	33	37	119	63	64	179	89	92			
60	34	36	120	61	64	180	92	89			

---

FONTE: O autor (2020).

TABELA 51 - PLANO DE MEDIÇÃO ADOTADO PARA O SISTEMA *IEEE* 118 BARRAS - MEDIDAS DE INJEÇÕES DE POTÊNCIAS E MAGNITUDES DE TENSÃO

$P_{inj}$ , $Q_{inj}$ e $V_{mag}$					
# Medida	Barra	# Medida	Barra	# Medida	Barra
1	1	21	38	41	77
2	3	22	40	42	78
3	4	23	42	43	80
4	6	24	46	44	85
5	8	25	49	45	87
6	10	26	54	46	89
7	11	27	55	47	90
8	12	28	56	48	91
9	15	29	59	49	92
10	18	30	60	50	99
11	19	31	61	51	100
12	24	32	62	52	103
13	25	33	65	53	104
14	26	34	66	54	105
15	27	35	69	55	107
16	30	36	70	56	110
17	31	37	72	57	111
18	32	38	73	58	112
19	34	39	74	59	113
20	36	40	76	60	116

FONTE: O autor (2020).

## APÊNDICE – C

### Resultados das simulações realizadas para o sistema *IEEE 118 BARRAS*

TABELA 52 - VARIÁVEIS DE RESTADO CALCULADAS E ESTIMADAS NO CASO BASE DO SISTEMA *IEEE 118 BARRAS*

Barra	V [p.u.]	$\hat{V}$ [p.u.]	$\theta$ [rad]	$\hat{\theta}$ [rad]	Barra	V [p.u.]	$\hat{V}$ [p.u.]	$\theta$ [rad]	$\hat{\theta}$ [rad]
1	1.03500	1.03508	0.00000	0.00000	60	0.99312	0.99319	-0.98517	-0.98499
2	0.98389	0.98396	-0.24477	-0.24473	61	0.99500	0.99507	-0.96977	-0.96960
3	0.99261	0.99269	-0.15700	-0.15699	62	0.99800	0.99807	-0.97690	-0.97672
4	0.99800	0.99807	-0.38134	-0.38130	63	0.96843	0.96851	-0.99589	-0.99571
5	0.99708	0.99716	-0.37442	-0.37438	64	0.98361	0.98369	-0.96306	-0.96288
6	0.99000	0.99008	-0.40003	-0.39998	65	1.00500	1.00507	-0.90729	-0.90712
7	0.98917	0.98925	-0.39878	-0.39874	66	1.05000	1.05008	-0.88936	-0.88919
8	1.01500	1.01507	-0.37585	-0.37581	67	1.01934	1.01941	-0.94303	-0.94286
9	1.04292	1.04298	-0.24924	-0.24922	68	0.99574	0.99581	-0.96317	-0.96297
10	1.05000	1.05006	-0.11693	-0.11688	69	0.95500	0.95508	-1.01733	-1.01713
11	0.98266	0.98274	-0.40774	-0.40769	70	0.98400	0.98408	-1.05487	-1.05467
12	0.99000	0.99008	-0.39020	-0.39016	71	0.98612	0.98621	-1.03554	-1.03534
13	0.95901	0.95909	-0.49210	-0.49205	72	0.98000	0.98008	-0.91877	-0.91861
14	0.97455	0.97464	-0.47881	-0.47875	73	0.99100	0.99108	-1.03937	-1.03918
15	0.97000	0.97007	-0.69946	-0.69935	74	0.95800	0.95808	-1.11082	-1.11060
16	0.97430	0.97439	-0.49001	-0.48994	75	0.95621	0.95630	-1.09735	-1.09714
17	0.99032	0.99037	-0.66244	-0.66233	76	0.94300	0.94310	-1.12319	-1.12297
18	0.97300	0.97306	-0.71419	-0.71408	77	1.00600	1.00609	-1.03983	-1.03962
19	0.96300	0.96307	-0.73407	-0.73396	78	1.00515	1.00524	-1.04213	-1.04193
20	0.95986	0.95993	-0.75093	-0.75081	79	1.01385	1.01394	-1.03099	-1.03079
21	0.96168	0.96173	-0.74675	-0.74662	80	1.04000	1.04008	-0.97237	-0.97217
22	0.97288	0.97293	-0.72883	-0.72871	81	0.99155	0.99162	-0.96644	-0.96625
23	0.99910	0.99916	-0.68487	-0.68475	82	0.99779	0.99787	-1.01904	-1.01883
24	0.99200	0.99208	-0.76627	-0.76614	83	0.99288	0.99297	-0.99344	-0.99324
25	1.05000	1.05006	-0.50646	-0.50637	84	0.98224	0.98233	-0.93915	-0.93894
26	1.01500	1.01507	-0.45268	-0.45260	85	0.98500	0.98508	-0.90693	-0.90673
27	0.96800	0.96807	-0.71296	-0.71285	86	0.98669	0.98677	-0.93083	-0.93062
28	0.96155	0.96161	-0.73399	-0.73388	87	1.01500	1.01508	-0.92631	-0.92610
29	0.96305	0.96313	-0.74120	-0.74108	88	0.98706	0.98713	-0.84496	-0.84478
30	0.97238	0.97246	-0.58684	-0.58675	89	1.00500	1.00507	-0.76915	-0.76898
31	0.96700	0.96707	-0.73556	-0.73545	90	0.98500	0.98507	-1.02626	-1.02606
32	0.96400	0.96407	-0.72397	-0.72386	91	0.98000	0.98008	-0.98633	-0.98613
33	0.96378	0.96383	-0.81079	-0.81064	92	0.99300	0.99307	-0.91694	-0.91675
34	0.98600	0.98608	-0.91135	-0.91119	93	0.98878	0.98885	-0.96344	-0.96325
35	0.97995	0.98004	-0.91906	-0.91890	94	0.99299	0.99307	-0.99577	-0.99557
36	0.98000	0.98009	-0.91902	-0.91886	95	0.98436	0.98444	-1.01060	-1.01039
37	0.98770	0.98779	-0.90323	-0.90307	96	0.99728	0.99736	-1.01095	-1.01075

38	0.95015	0.95024	-0.80286	-0.80272	97	1.01364	1.01372	-0.99782	-0.99762
39	0.96597	0.96605	-1.02590	-1.02573	98	1.02342	1.02350	-1.00529	-1.00509
40	0.97000	0.97009	-1.08140	-1.08120	99	1.01000	1.01008	-1.01699	-1.01679
41	0.96635	0.96644	-1.11612	-1.11591	100	1.01700	1.01707	-1.00411	-1.00390
42	0.98500	0.98509	-1.16192	-1.16171	101	0.99307	0.99313	-0.98238	-0.98216
43	0.98340	0.98349	-1.00171	-1.00152	102	0.99182	0.99189	-0.94055	-0.94036
44	1.00510	1.00519	-1.08767	-1.08746	103	1.00100	1.00107	-1.06695	-1.06674
45	1.00342	1.00351	-1.10066	-1.10044	104	0.97100	0.97107	-1.11475	-1.11454
46	1.00500	1.00508	-1.08364	-1.08343	105	0.96500	0.96507	-1.13408	-1.13386
47	1.00821	1.00829	-1.06990	-1.06969	106	0.96114	0.96121	-1.13852	-1.13830
48	1.02666	1.02674	-1.06965	-1.06945	107	0.95200	0.95206	-1.18746	-1.18723
49	1.02500	1.02508	-1.05263	-1.05243	108	0.96621	0.96629	-1.15502	-1.15480
50	1.00063	1.00071	-1.09304	-1.09286	109	0.96703	0.96710	-1.16292	-1.16269
51	0.96605	0.96615	-1.14513	-1.14493	110	0.97300	0.97309	-1.17769	-1.17747
52	0.95592	0.95604	-1.16359	-1.16337	111	0.98000	0.98009	-1.14898	-1.14876
53	0.94552	0.94563	-1.18555	-1.18533	112	0.97500	0.97509	-1.23179	-1.23155
54	0.95500	0.95510	-1.17326	-1.17305	113	0.99300	0.99306	-0.67388	-0.67378
55	0.95200	0.95210	-1.17524	-1.17503	114	0.96067	0.96075	-0.72915	-0.72905
56	0.95400	0.95410	-1.17427	-1.17405	115	0.96053	0.96060	-0.72919	-0.72908
57	0.97012	0.97020	-1.14638	-1.14616	116	1.00500	1.00507	-0.97145	-0.97126
58	0.95851	0.95860	-1.16268	-1.16247	117	0.97382	0.97391	-0.41710	-0.41708
59	0.98500	0.98508	-1.05859	-1.05840	118	0.94346	0.94355	-1.11760	-1.11738

FONTE: O autor (2020).

TABELA 53 – MÓDULOS E ÂNGULOS DE TENSÃO CALCULADOS E ESTIMADOS NO CASO INDUTIVO 1 DO SISTEMA *IEEE* 118 BARRAS

Barra	V [p.u.]	$\hat{V}$ [p.u.]	$\theta$ [rad]	$\hat{\theta}$ [rad]	Barra	V [p.u.]	$\hat{V}$ [p.u.]	$\theta$ [rad]	$\hat{\theta}$ [rad]
1	1.03500	1.03489	0.00000	0.00000	62	0.99800	0.99791	-0.99387	-0.99418
2	0.98259	0.98249	-0.25317	-0.25327	63	0.96843	0.96835	-1.01287	-1.01318
3	0.99028	0.99014	-0.15344	-0.15349	64	0.98361	0.98353	-0.98004	-0.98034
4	0.99800	0.99790	-0.39172	-0.39185	65	1.00500	1.00492	-0.92430	-0.92459
5	0.99683	0.99673	-0.38451	-0.38464	66	1.05000	1.04991	-0.90633	-0.90661
6	0.99000	0.98990	-0.41193	-0.41207	67	1.01934	1.01926	-0.96000	-0.96029
7	0.98918	0.98908	-0.41136	-0.41151	68	0.99572	0.99564	-0.98070	-0.98100
8	1.01500	1.01490	-0.38625	-0.38639	69	0.95500	0.95490	-1.03569	-1.03599
9	1.04292	1.04284	-0.25964	-0.25974	70	0.98400	0.98390	-1.07628	-1.07659
10	1.05000	1.04991	-0.12733	-0.12740	71	0.98603	0.98594	-1.05562	-1.05592
11	0.98260	0.98250	-0.42019	-0.42034	72	0.98000	0.97990	-0.93196	-0.93223
12	0.99000	0.98990	-0.40390	-0.40405	73	0.99100	0.99091	-1.05947	-1.05977
13	0.95894	0.95883	-0.50466	-0.50483	74	0.95800	0.95789	-1.13092	-1.13124
14	0.97460	0.97451	-0.49231	-0.49249	75	0.95620	0.95609	-1.11705	-1.11737
15	0.97000	0.96991	-0.71236	-0.71259	76	0.94300	0.94288	-1.14235	-1.14268
16	0.97433	0.97424	-0.50346	-0.50362	77	1.00600	1.00590	-1.05824	-1.05855
17	0.99027	0.99019	-0.67533	-0.67556	78	1.00515	1.00505	-1.06050	-1.06081



18	0.97300	0.97292	-0.72699	-0.72722	79	1.01385	1.01375	-1.04929	-1.04960
19	0.96300	0.96291	-0.74675	-0.74699	80	1.04000	1.03991	-0.99047	-0.99077
20	0.95976	0.95969	-0.76213	-0.76236	81	0.99152	0.99144	-0.98419	-0.98449
21	0.96150	0.96143	-0.75688	-0.75711	82	0.99779	0.99769	-1.03731	-1.03761
22	0.97264	0.97256	-0.73774	-0.73797	83	0.99288	0.99278	-1.01170	-1.01200
23	0.99888	0.99880	-0.69184	-0.69206	84	0.98224	0.98215	-0.95738	-0.95767
24	0.99200	0.99191	-0.77140	-0.77164	85	0.98500	0.98491	-0.92516	-0.92544
25	1.05000	1.04994	-0.50859	-0.50880	86	0.98669	0.98660	-0.94906	-0.94936
26	1.01500	1.01493	-0.45734	-0.45754	87	1.01500	1.01490	-0.94454	-0.94482
27	0.96800	0.96792	-0.73641	-0.73664	88	0.98706	0.98698	-0.86318	-0.86344
28	0.96152	0.96144	-0.75509	-0.75533	89	1.00500	1.00491	-0.78736	-0.78762
29	0.96300	0.96292	-0.75968	-0.75991	90	0.98500	0.98491	-1.04446	-1.04477
30	0.97186	0.97177	-0.59794	-0.59815	91	0.98000	0.97991	-1.00453	-1.00482
31	0.96700	0.96691	-0.75310	-0.75333	92	0.99300	0.99291	-0.93514	-0.93542
32	0.96400	0.96391	-0.74165	-0.74187	93	0.98878	0.98869	-0.98163	-0.98192
33	0.96369	0.96361	-0.82412	-0.82438	94	0.99299	0.99289	-1.01396	-1.01426
34	0.98600	0.98591	-0.92520	-0.92548	95	0.98436	0.98426	-1.02879	-1.02909
35	0.97993	0.97985	-0.93290	-0.93319	96	0.99728	0.99718	-1.02915	-1.02945
36	0.98000	0.97991	-0.93287	-0.93315	97	1.01364	1.01354	-1.01597	-1.01627
37	0.98762	0.98754	-0.91705	-0.91733	98	1.02342	1.02335	-1.02341	-1.02373
38	0.94970	0.94961	-0.81645	-0.81671	99	1.01000	1.00990	-1.03513	-1.03544
39	0.96591	0.96583	-1.04012	-1.04043	100	1.01700	1.01691	-1.02227	-1.02258
40	0.97000	0.96991	-1.09584	-1.09617	101	0.99307	0.99298	-1.00055	-1.00087
41	0.96634	0.96625	-1.13073	-1.13106	102	0.99182	0.99173	-0.95874	-0.95904
42	0.98500	0.98491	-1.17694	-1.17727	103	1.00100	1.00090	-1.08512	-1.08543
43	0.98327	0.98318	-1.01643	-1.01674	104	0.97100	0.97089	-1.13292	-1.13324
44	1.00502	1.00492	-1.10363	-1.10397	105	0.96500	0.96489	-1.15225	-1.15257
45	1.00341	1.00331	-1.11707	-1.11739	106	0.96114	0.96103	-1.15669	-1.15701
46	1.00500	1.00490	-1.10039	-1.10071	107	0.95200	0.95189	-1.20562	-1.20596
47	1.00822	1.00812	-1.08691	-1.08722	108	0.96621	0.96610	-1.17319	-1.17351
48	1.02666	1.02656	-1.08648	-1.08680	109	0.96703	0.96691	-1.18109	-1.18141
49	1.02500	1.02491	-1.06948	-1.06979	110	0.97300	0.97288	-1.19586	-1.19620
50	1.00063	1.00053	-1.10991	-1.11023	111	0.98000	0.97989	-1.16715	-1.16749
51	0.96605	0.96594	-1.16202	-1.16234	112	0.97500	0.97487	-1.24995	-1.25031
52	0.95592	0.95581	-1.18048	-1.18080	113	0.99300	0.99292	-0.68740	-0.68763
53	0.94552	0.94541	-1.20245	-1.20278	114	0.96068	0.96060	-0.74926	-0.74949
54	0.95500	0.95489	-1.19018	-1.19051	115	0.96054	0.96046	-0.74971	-0.74994
55	0.95200	0.95189	-1.19216	-1.19250	116	1.00500	1.00492	-0.98899	-0.98928
56	0.95400	0.95389	-1.19118	-1.19152	117	0.97382	0.97374	-0.43080	-0.43094
57	0.97012	0.97000	-1.16327	-1.16360	118	0.94345	0.94333	-1.13704	-1.13738
58	0.95851	0.95840	-1.17958	-1.17990	119	0.99770	0.99760	-0.20398	-0.20406
59	0.98500	0.98490	-1.07555	-1.07587	120	1.04090	1.04082	-0.54852	-0.54874
60	0.99312	0.99303	-1.00215	-1.00245	121	0.98816	0.98807	-0.81892	-0.81915
61	0.99500	0.99491	-0.98675	-0.98705					

FONTE: O autor (2020).

TABELA 54 – REATÂNCIAS EQUIVALENTES DOS TCSCS CALCULADAS E ESTIMADAS NO CASO INDUTIVO 1 DO SISTEMA *IEEE* 118 BARRAS

De [Barra]	Para [Barra]	$x^{TCSC}$ [p.u.]	$\hat{x}^{TCSC}$ [p.u.]
3	119	0.04263	0.04265
25	120	0.03575	0.03576
24	121	0.07735	0.07733

FONTE: O autor (2020).

TABELA 55 - MÓDULOS E ÂNGULOS DE TENSÃO CALCULADOS E ESTIMADOS NO CASO INDUTIVO 2 DO SISTEMA *IEEE* 118 BARRAS

Barra	V [p.u.]	$\hat{V}$ [p.u.]	$\theta$ [rad]	$\hat{\theta}$ [rad]	Barra	V [p.u.]	$\hat{V}$ [p.u.]	$\theta$ [rad]	$\hat{\theta}$ [rad]
1	1.03500	1.03496	0.00000	0.00000	62	0.99800	0.99801	-1.00088	-1.00100
2	0.98207	0.98203	-0.25642	-0.25649	63	0.96843	0.96845	-1.01988	-1.01999
3	0.98961	0.98956	-0.15228	-0.15232	64	0.98361	0.98363	-0.98705	-0.98717
4	0.99800	0.99798	-0.39576	-0.39585	65	1.00500	1.00501	-0.93132	-0.93144
5	0.99674	0.99672	-0.38844	-0.38853	66	1.05000	1.05001	-0.91333	-0.91345
6	0.99000	0.98998	-0.41654	-0.41664	67	1.01934	1.01934	-0.96700	-0.96712
7	0.98919	0.98917	-0.41623	-0.41632	68	0.99572	0.99573	-0.98797	-0.98808
8	1.01500	1.01499	-0.39031	-0.39040	69	0.95500	0.95502	-1.04333	-1.04344
9	1.04292	1.04290	-0.26370	-0.26378	70	0.98400	0.98401	-1.08530	-1.08541
10	1.05000	1.04998	-0.13139	-0.13147	71	0.98599	0.98600	-1.06404	-1.06415
11	0.98258	0.98255	-0.42502	-0.42511	72	0.98000	0.98000	-0.93725	-0.93739
12	0.99000	0.98997	-0.40919	-0.40928	73	0.99100	0.99101	-1.06790	-1.06801
13	0.95891	0.95887	-0.50956	-0.50967	74	0.95800	0.95801	-1.13935	-1.13946
14	0.97461	0.97457	-0.49756	-0.49767	75	0.95619	0.95620	-1.12529	-1.12540
15	0.97000	0.96998	-0.71752	-0.71764	76	0.94300	0.94301	-1.15035	-1.15046
16	0.97433	0.97431	-0.50871	-0.50881	77	1.00600	1.00602	-1.06589	-1.06600
17	0.99024	0.99023	-0.68053	-0.68065	78	1.00515	1.00517	-1.06814	-1.06826
18	0.97300	0.97298	-0.73212	-0.73224	79	1.01385	1.01386	-1.05690	-1.05702
19	0.96300	0.96298	-0.75182	-0.75194	80	1.04000	1.04001	-0.99798	-0.99810
20	0.95971	0.95969	-0.76653	-0.76667	81	0.99151	0.99152	-0.99155	-0.99167
21	0.96140	0.96138	-0.76078	-0.76090	82	0.99779	0.99781	-1.04490	-1.04501
22	0.97251	0.97249	-0.74108	-0.74121	83	0.99288	0.99291	-1.01929	-1.01940
23	0.99876	0.99873	-0.69430	-0.69444	84	0.98224	0.98226	-0.96496	-0.96508
24	0.99200	0.99197	-0.77304	-0.77317	85	0.98500	0.98502	-0.93274	-0.93286
25	1.05000	1.05000	-0.50855	-0.50868	86	0.98669	0.98672	-0.95664	-0.95676
26	1.01500	1.01500	-0.45853	-0.45864	87	1.01500	1.01503	-0.95211	-0.95222
27	0.96800	0.96799	-0.74705	-0.74718	88	0.98706	0.98708	-0.87075	-0.87087
28	0.96150	0.96149	-0.76454	-0.76466	89	1.00500	1.00501	-0.79492	-0.79504
29	0.96297	0.96296	-0.76779	-0.76792	90	0.98500	0.98501	-1.05202	-1.05213
30	0.97161	0.97160	-0.60227	-0.60239	91	0.98000	0.98001	-1.01209	-1.01219
31	0.96700	0.96699	-0.76074	-0.76087	92	0.99300	0.99302	-0.94269	-0.94281
32	0.96400	0.96399	-0.74939	-0.74952	93	0.98878	0.98880	-0.98919	-0.98929

33	0.96365	0.96364	-0.82947	-0.82959	94	0.99299	0.99300	-1.02151	-1.02162
34	0.98600	0.98599	-0.93079	-0.93091	95	0.98436	0.98437	-1.03635	-1.03646
35	0.97993	0.97992	-0.93848	-0.93861	96	0.99728	0.99729	-1.03671	-1.03682
36	0.98000	0.97999	-0.93845	-0.93857	97	1.01364	1.01364	-1.02351	-1.02362
37	0.98758	0.98757	-0.92262	-0.92274	98	1.02342	1.02344	-1.03094	-1.03104
38	0.94949	0.94949	-0.82192	-0.82204	99	1.01000	1.01002	-1.04267	-1.04278
39	0.96589	0.96588	-1.04588	-1.04601	100	1.01700	1.01702	-1.02982	-1.02993
40	0.97000	0.97000	-1.10170	-1.10184	101	0.99307	0.99308	-1.00811	-1.00821
41	0.96634	0.96634	-1.13665	-1.13679	102	0.99182	0.99184	-0.96630	-0.96641
42	0.98500	0.98501	-1.18306	-1.18319	103	1.00100	1.00103	-1.09266	-1.09277
43	0.98322	0.98322	-1.02241	-1.02252	104	0.97100	0.97102	-1.14046	-1.14057
44	1.00499	1.00501	-1.11018	-1.11029	105	0.96500	0.96502	-1.15979	-1.15990
45	1.00340	1.00343	-1.12381	-1.12393	106	0.96114	0.96116	-1.16424	-1.16435
46	1.00500	1.00503	-1.10729	-1.10740	107	0.95200	0.95203	-1.21317	-1.21328
47	1.00823	1.00825	-1.09393	-1.09405	108	0.96621	0.96623	-1.18073	-1.18084
48	1.02666	1.02669	-1.09342	-1.09353	109	0.96703	0.96705	-1.18863	-1.18874
49	1.02500	1.02502	-1.07643	-1.07654	110	0.97300	0.97303	-1.20341	-1.20351
50	1.00063	1.00066	-1.11687	-1.11697	111	0.98000	0.98003	-1.17469	-1.17480
51	0.96604	0.96608	-1.16899	-1.16909	112	0.97500	0.97504	-1.25750	-1.25760
52	0.95592	0.95595	-1.18745	-1.18755	113	0.99300	0.99298	-0.69293	-0.69305
53	0.94552	0.94556	-1.20943	-1.20952	114	0.96068	0.96068	-0.75822	-0.75835
54	0.95500	0.95503	-1.19715	-1.19725	115	0.96055	0.96054	-0.75888	-0.75900
55	0.95200	0.95203	-1.19914	-1.19924	116	1.00500	1.00501	-0.99625	-0.99637
56	0.95400	0.95403	-1.19816	-1.19826	117	0.97382	0.97378	-0.43609	-0.43619
57	0.97011	0.97016	-1.17024	-1.17033	118	0.94345	0.94346	-1.14517	-1.14528
58	0.95851	0.95853	-1.18655	-1.18666	119	0.99892	0.99890	-0.22091	-0.22099
59	0.98500	0.98502	-1.08255	-1.08266	120	1.03644	1.03641	-0.56864	-0.56877
60	0.99312	0.99313	-1.00916	-1.00927	121	0.98681	0.98680	-0.84216	-0.84230
61	0.99500	0.99501	-0.99376	-0.99387					

FONTE: O autor (2020).

TABELA 56 - REATÂNCIAS EQUIVALENTES DOS TCSCS CALCULADAS E ESTIMADAS NO CASO INDUTIVO 2 DO SISTEMA IEEE 118 BARRAS

De [Barra]	Para [Barra]	$x^{TCSC}$ [p.u.]	$\hat{x}^{TCSC}$ [p.u.]
3	119	0.06131	0.06132
25	120	0.05671	0.05671
24	121	0.11892	0.11895

FONTE: O autor (2020).

TABELA 57 - MÓDULOS E ÂNGULOS DE TENSÃO CALCULADOS E ESTIMADOS NO CASO CAPACITIVO 1 DO SISTEMA *IEEE* 118 BARRAS

Barra	V [p.u.]	$\hat{V}$ [p.u.]	$\theta$ [rad]	$\hat{\theta}$ [rad]	Barra	V [p.u.]	$\hat{V}$ [p.u.]	$\theta$ [rad]	$\hat{\theta}$ [rad]
1	1.03500	1.03517	0.00000	0.00000	62	0.99800	0.99811	-0.96764	-0.96729
2	0.98445	0.98459	-0.24106	-0.24093	63	0.96843	0.96853	-0.98664	-0.98628
3	0.99394	0.99416	-0.15868	-0.15859	64	0.98361	0.98371	-0.95379	-0.95344
4	0.99800	0.99812	-0.37685	-0.37667	65	1.00500	1.00510	-0.89801	-0.89768
5	0.99720	0.99732	-0.37007	-0.36989	66	1.05000	1.05011	-0.88011	-0.87978
6	0.99000	0.99013	-0.39483	-0.39464	67	1.01934	1.01944	-0.93377	-0.93342
7	0.98916	0.98929	-0.39326	-0.39307	68	0.99575	0.99586	-0.95346	-0.95311
8	1.01500	1.01512	-0.37144	-0.37126	69	0.95500	0.95513	-1.00696	-1.00661
9	1.04292	1.04303	-0.24483	-0.24469	70	0.98400	0.98413	-1.04208	-1.04171
10	1.05000	1.05012	-0.11252	-0.11243	71	0.98620	0.98632	-1.02383	-1.02347
11	0.98269	0.98283	-0.40227	-0.40209	72	0.98000	0.98013	-0.91274	-0.91241
12	0.99000	0.99014	-0.38416	-0.38398	73	0.99100	0.99112	-1.02765	-1.02729
13	0.95906	0.95919	-0.48650	-0.48630	74	0.95800	0.95813	-1.09906	-1.09868
14	0.97455	0.97470	-0.47277	-0.47255	75	0.95623	0.95636	-1.08592	-1.08555
15	0.97000	0.97011	-0.69342	-0.69314	76	0.94300	0.94313	-1.11219	-1.11180
16	0.97432	0.97443	-0.48393	-0.48371	77	1.00600	1.00612	-1.02943	-1.02907
17	0.99035	0.99045	-0.65627	-0.65600	78	1.00515	1.00527	-1.03176	-1.03140
18	0.97300	0.97310	-0.70817	-0.70788	79	1.01385	1.01397	-1.02068	-1.02032
19	0.96300	0.96311	-0.72820	-0.72791	80	1.04000	1.04011	-0.96221	-0.96186
20	0.95994	0.96004	-0.74635	-0.74606	81	0.99157	0.99167	-0.95656	-0.95622
21	0.96183	0.96194	-0.74311	-0.74281	82	0.99779	0.99791	-1.00875	-1.00839
22	0.97309	0.97318	-0.72625	-0.72596	83	0.99288	0.99301	-0.98316	-0.98281
23	0.99930	0.99942	-0.68397	-0.68368	84	0.98224	0.98237	-0.92888	-0.92854
24	0.99200	0.99212	-0.76686	-0.76655	85	0.98500	0.98513	-0.89667	-0.89634
25	1.05000	1.05010	-0.51058	-0.51034	86	0.98669	0.98683	-0.92057	-0.92022
26	1.01500	1.01510	-0.45435	-0.45412	87	1.01500	1.01513	-0.91605	-0.91570
27	0.96800	0.96810	-0.69609	-0.69582	88	0.98707	0.98719	-0.83471	-0.83440
28	0.96156	0.96165	-0.71947	-0.71920	89	1.00500	1.00512	-0.75891	-0.75863
29	0.96310	0.96320	-0.72931	-0.72904	90	0.98500	0.98513	-1.01602	-1.01567
30	0.97281	0.97292	-0.58227	-0.58202	91	0.98000	0.98012	-0.97610	-0.97575
31	0.96700	0.96710	-0.72461	-0.72433	92	0.99300	0.99312	-0.90671	-0.90639
32	0.96400	0.96411	-0.71280	-0.71252	93	0.98878	0.98889	-0.95322	-0.95288
33	0.96384	0.96394	-0.80441	-0.80410	94	0.99299	0.99311	-0.98555	-0.98519
34	0.98600	0.98612	-0.90457	-0.90423	95	0.98436	0.98448	-1.00038	-1.00002
35	0.97996	0.98008	-0.91229	-0.91195	96	0.99727	0.99739	-1.00072	-1.00037
36	0.98000	0.98012	-0.91225	-0.91191	97	1.01364	1.01375	-0.98763	-0.98727
37	0.98777	0.98789	-0.89648	-0.89614	98	1.02342	1.02355	-0.99511	-0.99474
38	0.95050	0.95062	-0.79630	-0.79599	99	1.01000	1.01012	-1.00679	-1.00643
39	0.96601	0.96616	-1.01883	-1.01846	100	1.01700	1.01712	-0.99390	-0.99354
40	0.97000	0.97015	-1.07415	-1.07376	101	0.99307	0.99318	-0.97216	-0.97182
41	0.96636	0.96651	-1.10876	-1.10836	102	0.99182	0.99193	-0.93033	-0.92999

42	0.98500	0.98515	-1.15422	-1.15381	103	1.00100	1.00113	-1.05674	-1.05637
43	0.98349	0.98360	-0.99425	-0.99388	104	0.97100	0.97113	-1.10454	-1.10415
44	1.00517	1.00525	-1.07922	-1.07886	105	0.96500	0.96513	-1.12387	-1.12348
45	1.00344	1.00353	-1.09186	-1.09150	106	0.96114	0.96127	-1.12832	-1.12792
46	1.00500	1.00511	-1.07457	-1.07420	107	0.95200	0.95215	-1.17725	-1.17683
47	1.00821	1.00832	-1.06061	-1.06024	108	0.96621	0.96633	-1.14481	-1.14441
48	1.02666	1.02677	-1.06050	-1.06014	109	0.96703	0.96715	-1.15271	-1.15231
49	1.02500	1.02511	-1.04346	-1.04310	110	0.97300	0.97312	-1.16749	-1.16708
50	1.00063	1.00074	-1.08387	-1.08350	111	0.98000	0.98013	-1.13877	-1.13838
51	0.96605	0.96616	-1.13595	-1.13557	112	0.97500	0.97512	-1.22158	-1.22116
52	0.95593	0.95603	-1.15440	-1.15402	113	0.99300	0.99310	-0.66706	-0.66679
53	0.94552	0.94562	-1.17635	-1.17595	114	0.96066	0.96076	-0.71559	-0.71531
54	0.95500	0.95510	-1.16405	-1.16366	115	0.96051	0.96062	-0.71521	-0.71494
55	0.95200	0.95210	-1.16603	-1.16563	116	1.00500	1.00510	-0.96174	-0.96139
56	0.95400	0.95410	-1.16506	-1.16466	117	0.97382	0.97395	-0.41105	-0.41088
57	0.97012	0.97022	-1.13718	-1.13680	118	0.94346	0.94360	-1.10637	-1.10598
58	0.95851	0.95862	-1.15348	-1.15308	119	0.98937	0.98966	-0.13560	-0.13563
59	0.98500	0.98511	-1.04934	-1.04897	120	1.05915	1.05925	-0.47133	-0.47112
60	0.99312	0.99322	-0.97591	-0.97556	121	0.99597	0.99610	-0.72837	-0.72806
61	0.99500	0.99511	-0.96051	-0.96016					

FONTE: O autor (2020).

TABELA 58 - REATÂNCIAS EQUIVALENTES DOS TCSCS CALCULADAS E ESTIMADAS NO CASO CAPACITIVO 1 DO SISTEMA IEEE 118 BARRAS

De [Barra]	Para [Barra]	$x^{TCSC}$ [p.u.]	$\hat{x}^{TCSC}$ [p.u.]
3	119	-0.01586	-0.01580
25	120	-0.02926	-0.02924
24	121	-0.05168	-0.05168

FONTE: O autor (2020).

TABELA 59 - MÓDULOS E ÂNGULOS DE TENSÃO CALCULADOS E ESTIMADOS NO CASO CAPACITIVO 2 DO SISTEMA IEEE 118 BARRAS

Barra	V [p.u.]	$\hat{V}$ [p.u.]	$\theta$ [rad]	$\hat{\theta}$ [rad]	Barra	V [p.u.]	$\hat{V}$ [p.u.]	$\theta$ [rad]	$\hat{\theta}$ [rad]
1	1.03500	1.03520	0.00000	0.00000	62	0.99800	0.99814	-0.96154	-0.96123
2	0.98487	0.98502	-0.23826	-0.23819	63	0.96843	0.96856	-0.98054	-0.98022
3	0.99514	0.99539	-0.16014	-0.16008	64	0.98361	0.98374	-0.94769	-0.94738
4	0.99800	0.99815	-0.37347	-0.37333	65	1.00500	1.00514	-0.89190	-0.89160
5	0.99731	0.99746	-0.36679	-0.36666	66	1.05000	1.05014	-0.87402	-0.87372
6	0.99000	0.99016	-0.39090	-0.39076	67	1.01934	1.01947	-0.92768	-0.92736
7	0.98915	0.98931	-0.38909	-0.38895	68	0.99576	0.99590	-0.94711	-0.94679
8	1.01500	1.01516	-0.36810	-0.36797	69	0.95500	0.95517	-1.00025	-0.99992
9	1.04292	1.04306	-0.24149	-0.24141	70	0.98400	0.98416	-1.03401	-1.03367
10	1.05000	1.05015	-0.10918	-0.10912	71	0.98624	0.98639	-1.01637	-1.01604

11	0.98272	0.98288	-0.39814	-0.39801	72	0.98000	0.98015	-0.90844	-0.90814
12	0.99000	0.99017	-0.37959	-0.37946	73	0.99100	0.99115	-1.02019	-1.01985
13	0.95909	0.95926	-0.48233	-0.48217	74	0.95800	0.95816	-1.09157	-1.09122
14	0.97454	0.97468	-0.46827	-0.46810	75	0.95623	0.95640	-1.07862	-1.07827
15	0.97000	0.97014	-0.68911	-0.68887	76	0.94300	0.94316	-1.10512	-1.10476
16	0.97431	0.97446	-0.47944	-0.47927	77	1.00600	1.00615	-1.02270	-1.02236
17	0.99037	0.99050	-0.65194	-0.65171	78	1.00515	1.00530	-1.02505	-1.02471
18	0.97300	0.97314	-0.70390	-0.70366	79	1.01385	1.01400	-1.01400	-1.01366
19	0.96300	0.96314	-0.72400	-0.72374	80	1.04000	1.04014	-0.95562	-0.95529
20	0.95998	0.96012	-0.74285	-0.74259	81	0.99158	0.99171	-0.95012	-0.94980
21	0.96190	0.96204	-0.74013	-0.73987	82	0.99779	0.99793	-1.00208	-1.00174
22	0.97318	0.97333	-0.72385	-0.72360	83	0.99289	0.99303	-0.97650	-0.97616
23	0.99939	0.99953	-0.68249	-0.68226	84	0.98224	0.98239	-0.92222	-0.92191
24	0.99200	0.99215	-0.76622	-0.76596	85	0.98500	0.98515	-0.89002	-0.88971
25	1.05000	1.05014	-0.51153	-0.51136	86	0.98669	0.98685	-0.91392	-0.91362
26	1.01500	1.01514	-0.45405	-0.45390	87	1.01500	1.01517	-0.90940	-0.90909
27	0.96800	0.96815	-0.68658	-0.68634	88	0.98707	0.98722	-0.82807	-0.82777
28	0.96157	0.96171	-0.71112	-0.71087	89	1.00500	1.00515	-0.75227	-0.75201
29	0.96312	0.96327	-0.72225	-0.72199	90	0.98500	0.98515	-1.00939	-1.00903
30	0.97303	0.97319	-0.57878	-0.57858	91	0.98000	0.98015	-0.96946	-0.96912
31	0.96700	0.96715	-0.71800	-0.71775	92	0.99300	0.99314	-0.90008	-0.89976
32	0.96400	0.96415	-0.70613	-0.70589	93	0.98878	0.98892	-0.94658	-0.94625
33	0.96388	0.96403	-0.79992	-0.79964	94	0.99299	0.99312	-0.97892	-0.97858
34	0.98600	0.98615	-0.89986	-0.89954	95	0.98436	0.98449	-0.99374	-0.99341
35	0.97997	0.98012	-0.90758	-0.90726	96	0.99727	0.99741	-0.99408	-0.99375
36	0.98000	0.98015	-0.90754	-0.90722	97	1.01364	1.01377	-0.98101	-0.98068
37	0.98780	0.98795	-0.89179	-0.89147	98	1.02342	1.02357	-0.98850	-0.98817
38	0.95069	0.95085	-0.79171	-0.79143	99	1.01000	1.01015	-1.00018	-0.99984
39	0.96604	0.96618	-1.01396	-1.01359	100	1.01700	1.01714	-0.98727	-0.98694
40	0.97000	0.97015	-1.06917	-1.06879	101	0.99307	0.99319	-0.96553	-0.96519
41	0.96636	0.96651	-1.10371	-1.10332	102	0.99182	0.99195	-0.92369	-0.92337
42	0.98500	0.98516	-1.14899	-1.14859	103	1.00100	1.00115	-1.05012	-1.04977
43	0.98355	0.98371	-0.98915	-0.98879	104	0.97100	0.97116	-1.09792	-1.09756
44	1.00520	1.00533	-1.07358	-1.07322	105	0.96500	0.96516	-1.11725	-1.11689
45	1.00344	1.00359	-1.08602	-1.08566	106	0.96114	0.96130	-1.12169	-1.12133
46	1.00500	1.00515	-1.06857	-1.06821	107	0.95200	0.95216	-1.17062	-1.17025
47	1.00820	1.00836	-1.05450	-1.05414	108	0.96621	0.96638	-1.13819	-1.13782
48	1.02666	1.02682	-1.05447	-1.05410	109	0.96703	0.96719	-1.14609	-1.14572
49	1.02500	1.02515	-1.03742	-1.03707	110	0.97300	0.97316	-1.16086	-1.16048
50	1.00064	1.00079	-1.07782	-1.07746	111	0.98000	0.98015	-1.13215	-1.13177
51	0.96605	0.96622	-1.12989	-1.12951	112	0.97500	0.97516	-1.21495	-1.21455
52	0.95593	0.95610	-1.14834	-1.14795	113	0.99300	0.99313	-0.66243	-0.66220
53	0.94552	0.94569	-1.17028	-1.16990	114	0.96065	0.96079	-0.70772	-0.70748
54	0.95500	0.95517	-1.15799	-1.15760	115	0.96050	0.96065	-0.70714	-0.70691
55	0.95200	0.95217	-1.15996	-1.15957	116	1.00500	1.00513	-0.95539	-0.95507
56	0.95400	0.95417	-1.15899	-1.15860	117	0.97382	0.97396	-0.40648	-0.40632

57	0.97012	0.97027	-1.13113	-1.13075	118	0.94347	0.94363	-1.09917	-1.09881
58	0.95851	0.95868	-1.14742	-1.14702	119	0.98622	0.98659	-0.11819	-0.11832
59	0.98500	0.98515	-1.04325	-1.04291	120	1.06369	1.06383	-0.45282	-0.45265
60	0.99312	0.99326	-0.96982	-0.96950	121	0.99849	0.99863	-0.70642	-0.70619
61	0.99500	0.99514	-0.95442	-0.95410					

FONTE: O autor (2020).

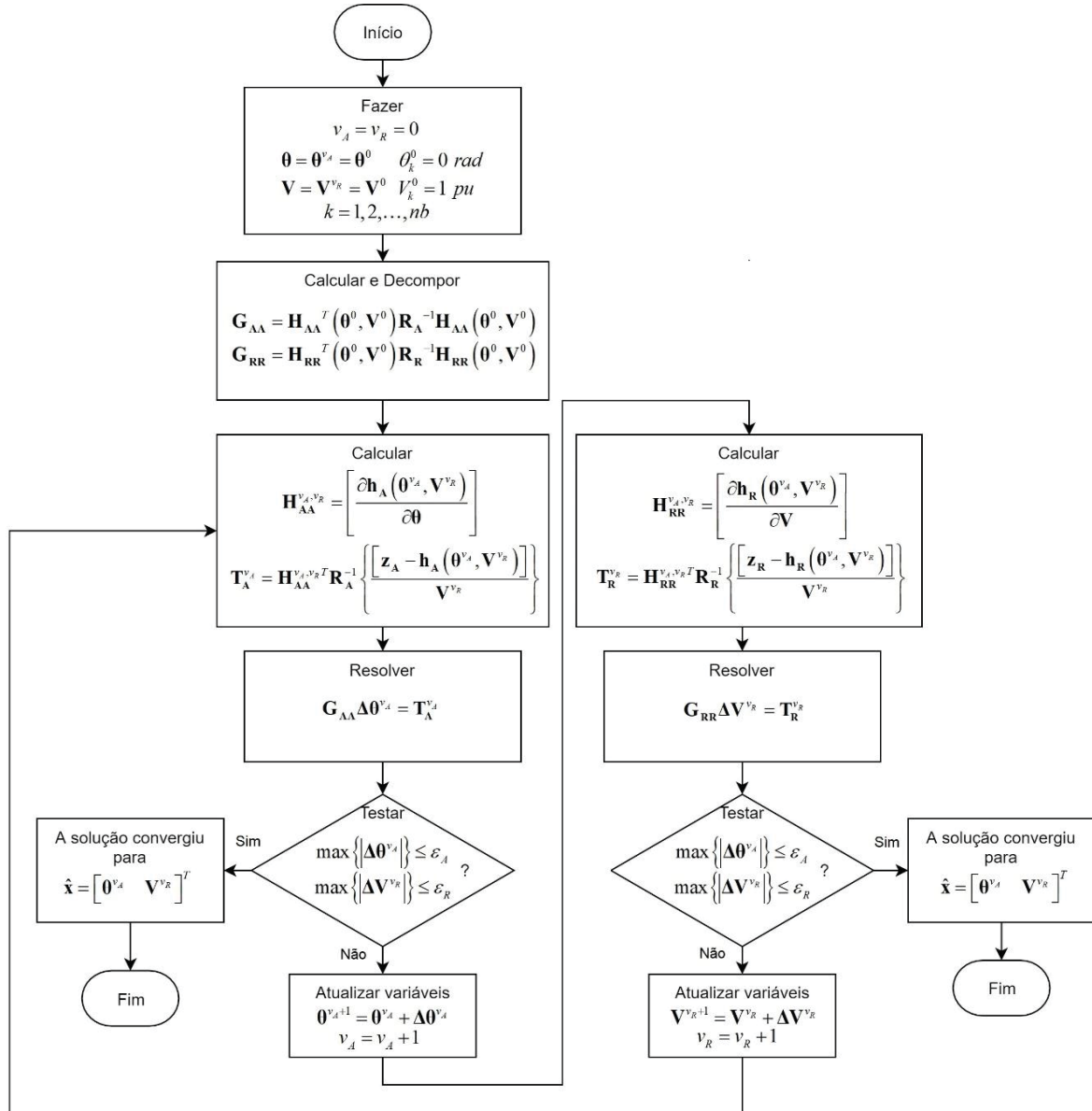
TABELA 60 - REATÂNCIAS EQUIVALENTES DOS TCSCS CALCULADAS E ESTIMADAS NO CASO CAPACITIVO 2 DO SISTEMA *IEEE* 118 BARRAS

De [Barra]	Para [Barra]	$x^{TCSC}$ [p.u.]	$\hat{x}^{TCSC}$ [p.u.]
3	119	-0.02752	-0.02741
25	120	-0.04203	-0.04204
24	121	-0.07697	-0.07696

FONTE: O autor (2020).

## ANEXO – A

FIGURA A.0.1 - FLUXOGRAMA DO ESTIMADOR DE ESTADO DESACOPLADO-RÁPIDO



FONTE: O autor (2020).